De bouwstenen van de schepping

Een zoektocht naar het allerkleinste

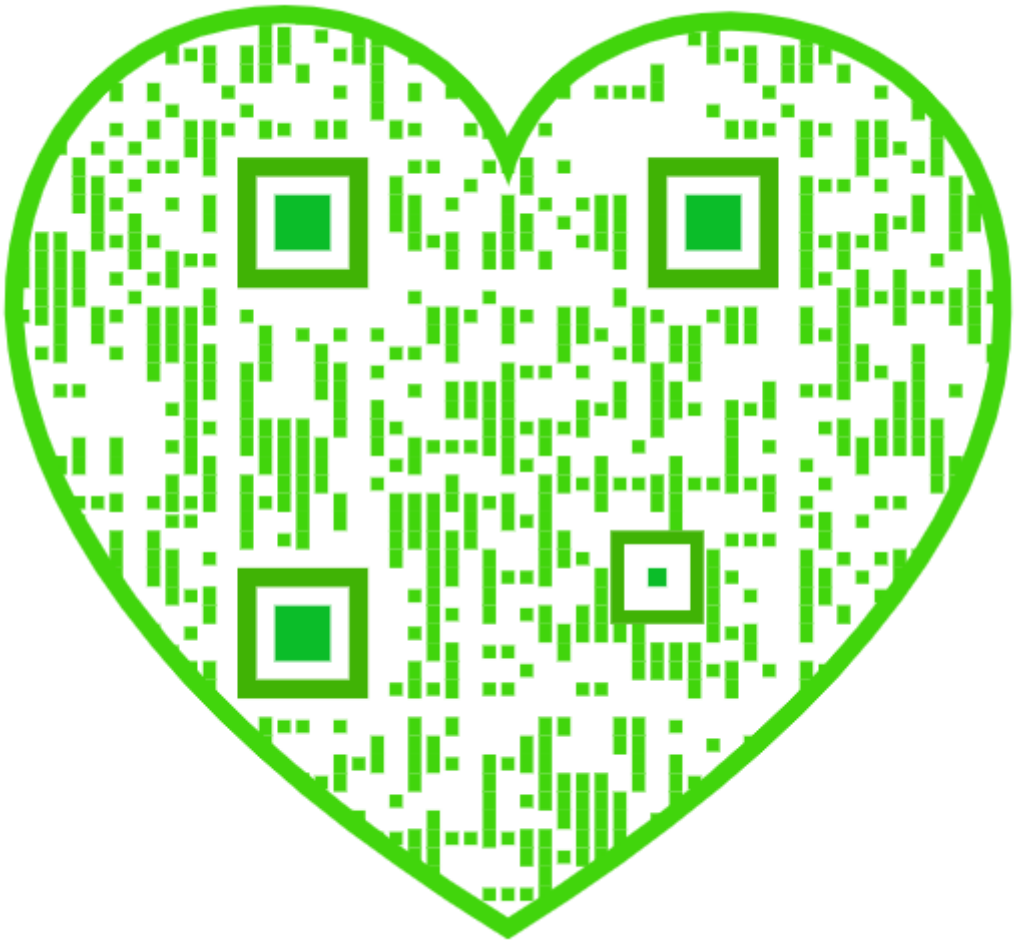
Gerard 't Hooft

bron
Gerard 't Hooft, *De bouwstenen van de schepping. Een zoektocht naar het allerkleinste*. Prometheus, Amsterdam 2002 (zesde druk)

Zie voor verantwoording: https://www.dbnl.org/tekst/hoof031bouw01_01/colofon.php

Let op: boeken en tijdschriftjaargangen die korter dan 140 jaar geleden verschenen zijn, kunnen auteursrechtelijk beschermd zijn. Welke vormen van gebruik zijn toegestaan voor dit werk of delen ervan, lees je in de gebruiksvoorwaarden.

dbnl digitale bibliotheek voor de Nederlandse letteren



Aan de nagedachtenis van mijn vader
Aan mijn moeder
Aan Betteke, Saskia en Ellen

Woord vooraf

Wie zich waagt in de wereld van de allerkleinste schepseltjes, of er zelfs maar over wil praten, kan dat niet zonder een goed begrip van de natuurwetten die die wereld beheersen. De krachten die er heersen bepalen alle bewegingen en ook alle andere eigenschappen van de dingetjes die we willen bestuderen. Van deze krachten hangt af of, en hoe, we ze kunnen waarnemen.

Dat praten valt dan niet mee, want de natuurwetten zijn ingewikkeld. Meer en meer nemen de deskundigen op dit gebied hun toevlucht tot een wiskundig gebrabbel dat geen mens meer kan begrijpen als hij er geen langdurige studie van heeft gemaakt. Om de bikkelharde logische strengheid van onze natuurwetten goed te kunnen waarderen, kun je eigenlijk niet buiten de wiskunde. Toch voelen wij natuurkundigen een behoefte om al het moois dat we ontdekt hebben aan iedereen die maar luisteren wil te vertellen. Dan moet je niet met die wiskunde aankomen, en dat doe ik dan ook maar niet in dit boek.

Met dit boek heb ik mij ten doel gesteld u te verhalen over ruim dertig jaar onderzoek naar de allerkleinste deeltjes van de materie. In die dertig jaar ben ik de Natuur gaan zien als een grote legpuzzel, een intelligentietest die de mensheid als geheel werd voorgelegd. Steeds weer vinden we kleine of grotere puzzelstukjes die op een schitterende manier op hun plaats vallen. Het gevoel van triomf dat zich dan van ons meester maakt, wil ik met u delen.

Dus komt het op de kunst van vertalen aan; vertalen in gewoon Nederlands. Dat kan wel, maar er zal het een en ander verloren gaan, vooral wanneer ik ‘argumenten’ probeer te formuleren die gebruikt worden om een bepaalde theorie of beschrijving te rechtvaardigen en andere te weerleggen. Als u iets niet begrijpt mag u dat mij natuurlijk verwijten, maar ik zal de moeilijkheid van het vertalen van wiskundige formules in het

Nederlands als verzachtende omstandigheid aanvoeren.

In vele gevallen zal ik niet eens proberen een precieze uitleg van iets te geven. Vele mededelingen zal een lezer die niet uitvoerig vertrouwd is met de theoretische natuurkunde ‘op gezag’ moeten aannemen. Waar het me dan om gaat is dat u de inhoud van de mededeling een beetje begrijpt of aanvoelt, zonder al te diep op de details in te gaan van de (meestal uitvoerige) geschiedenis van hoe we aan die wijsheid zijn gekomen.

De eerste hoofdstukken vormen een samenvatting van onze kennis van de wereld der moleculen, atomen en atoomkernen. Over de uiterst boeiende speurtocht die tot deze kennis heeft geleid, zal ik slechts hier en daar iets zeggen. In die tijd had de schrijver dezes nog niet eens een luier aan en hij laat daarom het verslag daarvan liever aan historici over.[1] Waar dit boek over gaat, is de speurtocht die daarna kwam.

In dertig jaar heeft deze onze kennis omtrent de ‘elementaire deeltjes’ zo enorm uitgebreid dat sommige onderzoekers reeds meenden dat het einde ervan in zicht kwam: de uiteindelijke theorie van alle deeltjes en krachten. Misschien duidt alleen al de gedachte aan zo'n allesoverkoepelende theorie op een grenzeloze zelfoverschatting, of een bagatellisering van de schepping waarin wij leven, maar ik zal er wel iets over zeggen; de gedachte is minder absurd dan zij lijkt.

Dit boek is dus niet bedoeld als historisch overzicht van het gehele vakgebied van de elementaire deeltjes. Zulke boeken bestaan er al[2] en zijn zeer de moeite waard. Ik heb evenmin de bedoeling gehad een systematische inleiding in de deeltjesfysi-

1 Zie bijvoorbeeld A. Pais, *Inward Bound. Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford, Clarendon Press/ New York, Oxford University Press, 1986.

2 Zie bijvoorbeeld Robert P. Crease and Charles C. Mann, *The Second Creation. Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics*. New York, Macmillan, 1986.

ca te schrijven,[1] al is het eindresultaat daar een beetje op gaan lijken. Dit wordt een persoonlijk relaas van een ontwikkelingsfase in dit vak. De bedoeling is u deelgenoot te maken van het enthousiasme van de vele onderzoekers, gebruikmakend van termen die voor iedereen hopelijk een beetje begrijpelijk zullen zijn.

Personen die ik bij naam en toenaam noem, zijn degenen die op een of andere manier een belangrijke rol gespeeld hebben bij de totstandkoming van het beeld van de kleine deeltjes zoals ik dat schetsen wil. Het zijn mensen die ik ieder voor hun aandeel bewonder, en zelfs in die kleine selectie zitten nog vele omissies. Voor de onnauwkeurigheden die ik misschien zal begaan bij het wel of niet noemen van namen bied ik bij voorbaat mijn excuses aan.

Een sprankje nationale trots zult u me wel willen vergeven. Er zijn heel wat Nederlandse onderzoekers die hun sporen verdiend hebben op dit terrein, en hun namen zal ik dan ook vermelden. Minder vergeeflijk is dat de rol die ik zelf gespeeld heb in dit onderzoek groter zal lijken dan deze in werkelijkheid is.

1 Zie bijvoorbeeld *Van quantum tot quark. Inleiding tot de quantummechanica: golven en deeltjes*. Stichting Teleac, 1989, of Anthony Hey and Patrick Walters, *The Quantum Universe*. Cambridge, Cambridge University Press, 1987, of Leon M. Lederman en David N. Schramm, *Van quark tot kosmos. Onderzoek naar het gedrag van de materie*. Maastricht/Brussel, Natuur & Techniek, 1991, of L.M. Brown and H. Rechenberg, *The Origin of the Concept of Nuclear Forces*. London, I.O. Publishing Ltd., 1996. U kunt ook teksten over de elementaire deeltjes in de vorm van een stripverhaal krijgen: *Bouwstenen van het heelal*. NIKHEF 1982, Uitgave NIKHEF voorlichting, Postbus 41882, 1009 DB Amsterdam; Brian Southworth en Georges Boixader, *Een Wereld van Deeltjes. Beeldverhaal over atomen, quarks en leptonen*. CERN, in het Nederlands vertaald door Rita van Peteghem, 2001.

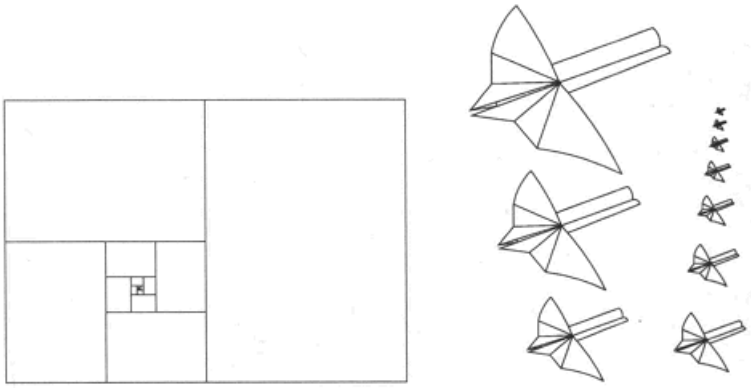
Dat kan ik niet helemaal vermijden; ik laat u immers als het ware door mijn eigen ogen meekijken naar de elementaire deeltjes. Wat dan dichtbij is, lijkt daarom heel groot.

De wereld van de elementaire deeltjes had ik nooit tot in zulke diepte kunnen doorgronden zonder de wijze lessen van mijn leermeesters. De eersten waren mijn leraar op de middelbare school, wijlen dr. W.P.J. Lignac, en mijn oom, prof. dr. N.G. van Kampen. Na de essentiële lessen van mijn promotor, prof. dr. M.J.G. Veltman heb ik geprofiteerd van talloze discussies met collega-onderzoekers uit de hele wereld. Zij allen deelden met mij hun ideeën over de aard van de fysische werkelijkheid, en daaruit vloeiden mijn eigen ideeën voort. Samen met hen koester ik de momenten waarin nieuwe, heldere inzichten totstandkwamen.

Familie, vrienden en mijn dierbare gezin hebben mij steeds voor de volle 100 procent gesteund, ook als ik in gedachten niet bij hen was maar verzonken in wiskundige formules. Ze namen me zoals ik was en gaven me de ruimte zodat ik de gelegenheid kreeg dit boek te schrijven.

1 Aanvang van de reis naar het kleine: knippen

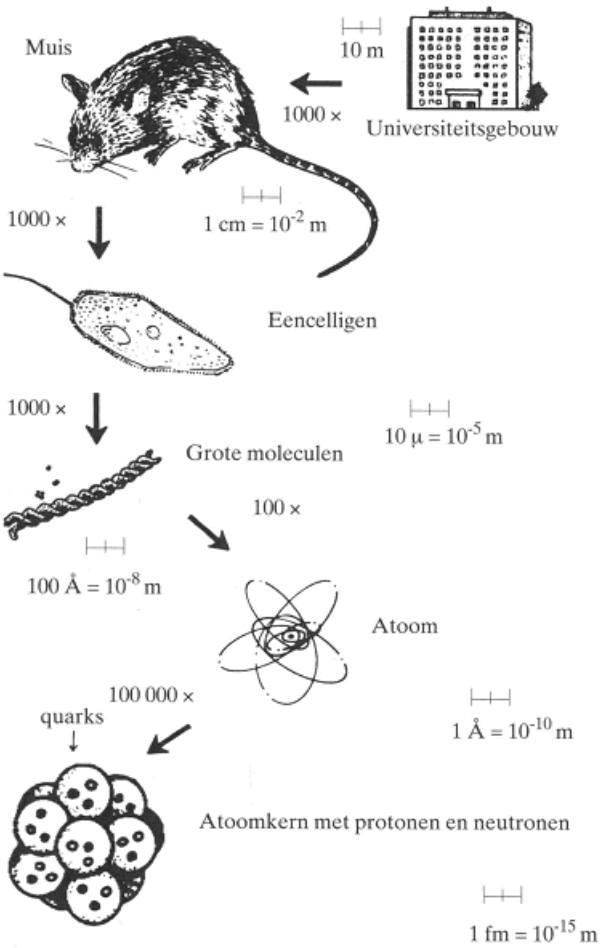
Laat ik mijn reis naar het kleine beginnen bij wat we met het blote oog nog kunnen zien, en bij natuurwetten waar we allen vertrouwd mee zijn. Neemt u eens een groot vel papier en vouw er een vliegtuigje van. U had het papier ook in twee stukken kunnen knippen en er twee kleinere vliegtuigjes van kunnen vouwen. Op hun beurt kunnen die stukken papier nog verder worden verknipt. De eigenschappen van het papier, bijvoorbeeld de mogelijkheid er vliegtuigjes van te vouwen, verande-



Figuur 1. Geknipt papier.

ren bijna niet, alleen de vliegtuigjes worden steeds kleiner. Wel zal het u, naarmate u doorgaat met knippen, steeds moeilijker vallen een vliegtuigje te maken, en ten slotte hebben we nog maar kleine vezeltjes over van wat eens papier was. De eigenschap ‘vouwbaar tot vliegtuig’ is dan verloren gegaan.

Een soortgelijke situatie hebben we als we een bak water uit-


Muis
10 m
1000 ×
Universiteitsgebouw
1000 ×
1 cm = 10-2 m
Eencelligen
1000 ×
10 μ = 10-5 m
Grote moleculen
100 ×
100 Å = 10-8 m
Atoom
100 000 ×
quarks
1 Å = 10-10 m
Atoomkern met protonen en neutronen
1 fm = 10-15 m

Figuur 2.

gieten in twee of meerdere kleinere bakken. De natuurkundige eigenschappen van water, zoals: ‘stroomt van hoog naar laag’, blijven dezelfde, totdat we minder dan een druppel over hebben. Druppels laten zich niet meer ‘gieten’ van hoog naar laag, je moet ze losschudden.

Ieder kind dat met speelgoedautootjes of poppetjes speelt weet dat je de wereld van het grote in het klein op schaal kunt nabootsen. De schrijver Jonathan Swift heeft hierop zijn beroemde verhalen gebaseerd. Een ontdekkingsreiziger, Gulliver genaamd, komt terecht in het land Lilliput, waar heel kleine mensjes wonen. Alles is er heel klein; ook de natuur, de planten en dieren zijn er op schaal uitgevoerd. Zelf wordt hij als een reus, de Man-Berg, beschouwd. Een gevaarlijke brand in het Koninklijke Paleis weet hij te blussen door er een plasje op te doen.

Tijdens een andere reis brengt het wonderbaarlijke lot Gulliver naar een land, Brobdingnag genaamd, waar de mensen en ook alle andere levende en levenloze zaken in de natuur veel groter zijn dan bij ons. Gulliver is daar een dwergje, vertroeteld door het negenjarige meisje Glumdalclitch. Hij wordt uiteindelijk met kooi en al opgepikt door een adelaar die hem in zee laat vallen, waar hij door gewone maar verbaasde zeelui wordt gered.

Maar hoe knap ook verteld, deze verhalen roepen vragen op. We weten dat kleine kaarsjes een bijna even grote vlam hebben als grote kaarsen. Hoe groot waren de vlammetjes van de kaarsen in Lilliput? En hoe langer je denkt, hoe meer vragen: hoe groot waren de regendruppels in Lilliput en in Brobdingnag? Waren de natuurwetten voor water daar anders dan bij ons? En de natuurkundige vraagt ten slotte: hoe groot waren de atomen in die landen? Welke chemische bindingen zouden die aangaan met de atomen van Gulliver zelf?

Op deze punten lopen deze verhalen vast. De werkelijke reden waarom zulke werelden niet kunnen bestaan, is dat de na-

tuurwetten bij een schaalverandering niet exact dezelfde blijven. Dat zien we wel eens als er een spannende rampenfilm wordt vertoond. Een vloedgolf of een brandende wolkenkrabber wordt dan meestal op schaal nagebootst. Het beste resultaat krijg je meestal als je als schaalfactor voor de tijd de wortel kiest van de schaalfactor voor afmetingen, dus als de wolkenkrabber op schaal 1:9 is nagemaakt moet de film drie keer zo langzaam worden afgedraaid. Maar ook dan kan het geoefende oog nog steeds het verschil met de werkelijkheid zien.

En zo hebben we in deze inleiding twee belangrijk aspecten van de natuur ontdekt: vele natuurwetten blijven dezelfde wanneer we een schaalverandering uitvoeren, maar er zijn verschijnselen, zoals de brandende kaars en de waterdruppeltjes, die niet ‘meeschalen’. Dit zal er uiteindelijk toe leiden dat de wereld van het heel kleine onvergelijkbaar wordt met de gewone wereld.

2 Naar de moleculen en de atomen

Voor levende wezens is dit niet anders. De anatomie van een muis is in vele opzichten een verkleinde kopie van die van een olifant, maar er zijn belangrijke verschillen. Zo valt ons op dat een muis met gemak een loodrechte wand kan beklimmen, en als hij eens een keertje valt, van een hoogte die tientallen malen groter is dan hijzelf, ondervindt hij daar nauwelijks schade van. Dat zouden we van een olifant niet kunnen zeggen. Algemeen geldt dat de zwaartekracht minder belangrijk wordt naarmate we naar kleinere (levende of levenloze) objecten gaan kijken.

Komen we bij de eencellige diertjes dan zien we dat deze helemaal geen onderscheid meer maken tussen boven en onder. Voor hen is de *oppervlaktespanning* van water een veel belangrijkere kracht dan de zwaartekracht. Oppervlaktespanning is ook de kracht die een druppel water zijn vorm geeft. Voor de kleinste diertjes zijn waterdruppels heel groot; voor hen is oppervlaktespanning dus erg belangrijk.

Oppervlaktespanning is een gevolg van het feit dat alle moleculen en atomen elkaar aantrekken met een kracht die we de VanderWaalskracht noemen. De VanderWaalskracht heeft slechts een zeer korte reikwijdte. Om precies te zijn: de sterkte van de kracht over een afstand r is ongeveer evenredig met $1/r^7$. Ofwel, verminder je de afstand tussen twee atomen met de helft, dan wordt de VanderWaalskracht waarmee ze elkaar aantrekken $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 128$ maal zo groot. Als atomen of moleculen dicht bij elkaar in de buurt komen kunnen ze elkaar heel stevig vasthouden met deze kracht.

Johannes Diderik van der Waals (1837-1923) promoveerde in 1873 in Leiden op een dissertatie die hem beroemd zou maken: *Over de continuïteit van de gas- en vloeistoftoestand*. Het bestaan van moleculen en atomen was toen nog lang niet algemeen aanvaard, maar hij toonde aan dat eigenschappen van gassen en

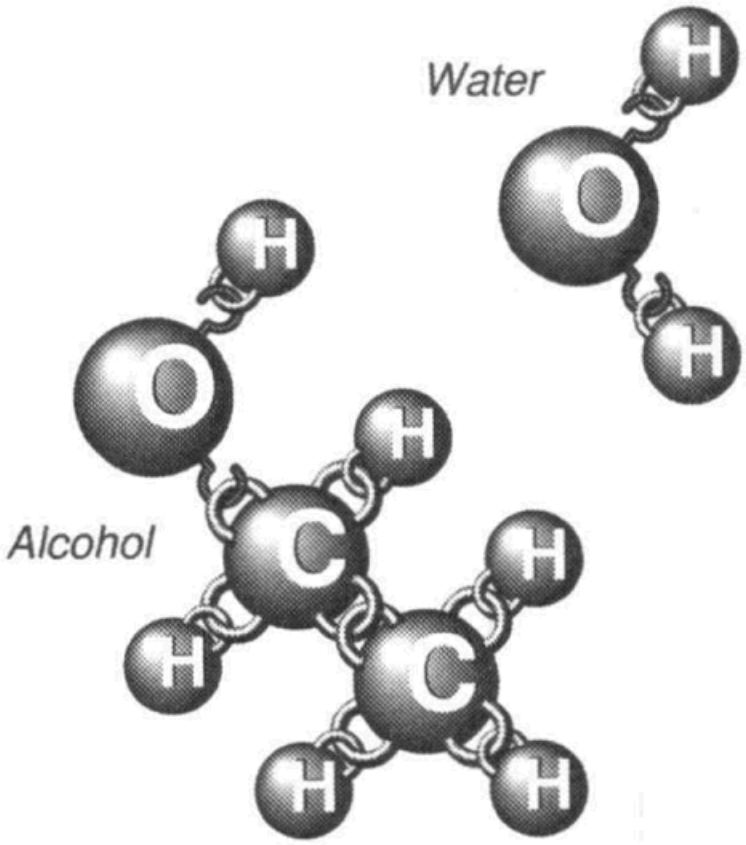
vloeistoffen heel goed begrepen kunnen worden als men aanneemt dat deze kleine deeltjes ieder een zeker volume innemen, en op wat grotere afstand van elkaar elkaar allemaal aantrekken. Hij slaagde er ook in een zeer goede schatting te maken van hun massa en grootte. De befaamde Schotse natuurkundige James C. Maxwell, die zeer onder de indruk was van dit werk, merkte op dat diverse onderzoekers hiervoor de studie van 'the Low Dutch language' (Nederlands dus) ter hand hadden genomen.[1] Van der Waals kreeg in 1910 de Nobelprijs, maar het Nederlands heeft het nooit gehaald als internationale taal van de wetenschap. In voorafgaande eeuwen waren dat het Latijn en het Grieks; later Duits en Engels. Tegenwoordig, hoe spijtig sommigen dat ook vinden, gebeurt alles in het Engels.

De grootte van de eencellige plantjes en diertjes meten we in *microns*; een micron is het duizendste deel van een millimeter en dat is ongeveer het kleinste wat men met een gewone microscoop nog kan zien. De wereld van de eencelligen is geweldig boeiend, maar daar gaat dit boek niet over. Wij zetten onze reis naar het kleine voort en komen dan terecht bij de atomen en moleculen zelf. Uiteindelijk moet de VanderWaalskracht wijken voor een veel ingewikkelder krachtenspel, en wel dat van de *scheikunde*.

De scheikundige stelt zich de atomen voor als min of meer bolvormige objecten waarvan de diameter één of enkele Ångström bedraagt. Een Ångström is het tienduizendste deel van een micron ofwel 10^{-10} m (een tienmiljardste meter). Praktisch alle massa van het atoom bevindt zich in een heel klein pitje in het midden. Dat is de kern, waarover later meer.

Wie nog niet vertrouwd is met het begrip 'massa' mag als vuistregel gebruiken dat alle objecten in zijn omgeving een massa hebben die gelijk is aan hun gewicht (we drukken ook massa uit in grammen of kilogrammen), maar *gewicht* is de kracht waarmee

1 Zie H.B.G. Casimir, *Het toeval van de werkelijkheid. Een halve eeuw natuurkunde*. Amsterdam, Meulenhoff, 1983. Engelstalige versie: *Haphazard Reality*. New York, Harper & Row, 1983.



Figuur 3. Atomen zitten aan elkaar vast alsof ze haken en ogen hebben.

de aarde aan die massa trekt. In een ruimteschip is uw massa dezelf de als op aarde, maar is uw gewicht meestal ongeveer nul.

Terug naar de atomen nu. Deze atomen oefenen heel ingewikkelde krachten op elkaar uit; het is een beetje alsof er haken en ogen aan zitten waarmee ze zich aan elkaar kunnen vasthechten. De stevige klontjes van meerdere atomen die daardoor kunnen worden gevormd heten *moleculen*.

Het zuurstofatoom bijvoorbeeld, (O) heeft twee haken, en het waterstofatoom (H) heeft één oog. Eén O- en twee H-atomen kunnen samen een molecule van water (H2O) vormen. Twee ogen kunnen ook aan elkaar vastzitten (bijvoorbeeld H_2 = waterstofgas) en twee haken ook (O_2 = zuurstofgas), maar dat zit wat minder stevig.

De twee haken van het zuurstofatoom zitten niet recht tegenover elkaar, maar onder een hoek van ruim 104^o. Een dergelijke situatie doet zich bij vele andere atoomsoorten ook voor, zodat de moleculen algauw een ruimtelijk ingewikkelde vorm krijgen. Eén van de mooiste bouwstenen is het koolstofatoom, dat vier ogen heeft die zich ook goed aan elkaar hechten. Bijna alle moleculen waar levende wezens uit bestaan hebben ketens van koolstofatomen in hun binnenste.

Er zijn ruim honderd soorten atomen, en elke soort oefent

krachten uit die meer of minder verschillen van wat de andere soorten doen. Stoffen die uit slechts één soort atomen bestaan noemen we de *scheikundige elementen*. Het woord ‘atoom’ is afgeleid uit het Griekse *atomos*, dat ‘ondeelbaar’ betekent. Ook het woord ‘element’ suggereert dat we hier bij de fundamentele bouwstenen van de materie zijn aangekomen. Daar leek het inderdaad op toen men, in het midden van de vorige eeuw, deze woorden bedacht. Een vergissing, zoals we nu weten, want atomen zijn wel degelijk stuk te krijgen, en ook de elementen zijn niet echt elementair meer. Men heeft deze in wezen onjuiste benaming gehandhaafd omdat zij nu eenmaal is ingeburgerd, maar denkt u vooral niet dat de mensheid hier nu van geleerd heeft! Het woord ‘elementaire deeltjes’ is al net zo onhandig gekozen. Trouwens, wat vindt u van de benaming ‘nieuwe geschiedenis’ (de tijd van de Renaissance) en ‘nieuwste geschiedenis’ (wat daarna weer kwam)? Van een dergelijk woordgebruik zal men later beslist spijt krijgen.

Misschien vindt u de schets die ik u gaf van de atomen als waren het kleine bolletjes met haken en ogen eraan niet wetenschappelijk genoeg. We spreken dan ook liever van *chemische binding*, waarmee we aanduiden op welke manier atomen andere aan zich kunnen binden. Ik schrijf er zo luchtigjes over omdat er een bijzonderheid over te melden is: *de natuurwetten die aan de chemische binding ten grondslag liggen zijn volledig bekend*!

Deze mededeling zal u wellicht verbazen. Is de scheikunde hiermee dan klaar en afgehandeld, zult u misschien vragen, terwijl u daar nog niets over heeft gehoord? Nee, is het antwoord, het zijn de fundamentele formules waarmee deze bindingskracht kan worden uitgerekend, die volledig bekend zijn, maar het rekenen met deze formules is dermate ingewikkeld dat men al heel gauw is aangewezen op benaderingstechnieken waarvan de nauwkeurigheid niet altijd precies is te overzien. Zelfs bij eenvoudige moleculen als die van water of alcohol zullen makkelijk uit te voeren experimenten betere inzichten verschaffen dan berekeningen *ab initio* met onze formules. Als u van me wilt aannemen dat de wiskunde waar-

op onze huidige benaderingstechnieken zijn gebaseerd al heel ver is gevorderd, kan ik u vertellen dat een beschrijving van atomen als bolletjes met haken en ogen eraan zo slecht nog niet is.

Toch zijn er niet werkelijk haakjes en oogjes. Wat het atoom zijn praktisch bolvormige gedaante geeft zijn de *elektronen*, elektrisch geladen deeltjes die om de kern heen dartelen. Elektronen zijn heel licht: hun massa is slechts ongeveer 1/1836e van die van de lichtste atoomkern (waterstof). Hun elektrische lading is tegengesteld aan die van de kern, zodat ze er sterk door worden aangetrokken, maar elkaar stoten ze af. Er ontstaat evenwicht zodra de totale elektrische lading van alle elektronen de lading van de kern precies compenseert. Daar zijn meestal meerdere elektronen voor nodig. Het atoom is dan elektrisch neutraal.

De krachten die de elektronen ondergaan zijn dus eigenlijk van een wiskundig heel eenvoudige gedaante; we noemen dit de elektrostatische of *Coulombkracht*. Toch zijn het de elektronen waaraan het atoom zijn merkwaardige gedrag heeft te danken dat ik hierboven aanduidde met ‘chemische binding’. Dat komt omdat de *bewegingswetten* van de elektronen zo bijzonder zijn. Hun bewegingen worden volledig gedicteerd door de *quantummechanica*. De theorie die we quantummechanica noemen, kwam in het begin van de twintigste eeuw gereed. Ze is paradoxaal, moeilijk te begrijpen of uit te leggen, maar fantastisch, revolutionair, boeiend en moeilijk weg te denken uit de theoretische natuurkunde en staat al helemaal centraal in de wereld van de allerkleinste deeltjes. Over die quantummechanica straks veel meer, al zal ik niet uitgebreid proberen het scheikundige gedrag van atomen hiermee te verklaren (ook al kan dit wel!).

De kernen van de atomen, en de atomen in hun geheel, gehoorzamen even goed aan de wetten van de quantummechanica als de elektronen, maar omdat deze kernen zoveel zwaarder zijn merken we daar meestal veel minder van. De scheikundige mag daarom zijn atomen in hun geheel als gewone stuiterende biljartballen beschouwen, die alleen merkwaardige krachten op elkaar uitoefenen als ze dicht bij elkaar komen.

3 Het toverachtige gedrag der quanta...

De twintigste-eeuwse natuurkunde begon precies in het jaar 1900 toen de Duitse natuurkundige Max Planck een mogelijke oplossing voorstelde voor een probleem waar men al jaren mee worstelde. Het probleem zat in het licht dat uitgezonden wordt door alle objecten die tot een zekere temperatuur zijn verhit, en de ‘zachtere’ warmtestraling die ook, in mindere mate, door koudere objecten wordt uitgezonden.

Het was inmiddels bekend dat al deze straling van elektromagnetische oorsprong is en men kende de natuurwetten hiervoor, alsook de natuurwetten voor de warmteleer. Althans, zo leek het. Maar als we de intensiteit van de straling uitrekenen dan klopt het antwoord helemaal niet. Er zou *oneindig veel* straling van uiterst korte golflengte uitgezonden moeten worden, maar in plaats daarvan neemt men waar dat de stralingsintensiteit een piek vertoont bij een zekere karakteristieke golflengte. Deze karakteristieke golflengte is omgekeerd evenredig met de absolute temperatuur van het stralende object (absolute temperatuur wordt gedefinieerd op een schaal waarvan het nulpunt ligt bij -273°C). Bij ongeveer 1500°C wordt een voorwerp roodgloeiend, en dan pas wordt dus het zichtbare licht bereikt. Bij langere en kortere golflengte is de stralingsintensiteit minder.

Wat Planck voorstelde, was niets anders dan dat de straling in pakketjes van vaste grootte wordt afgegeven. De grootte van zo'n energiepakketje, of *quantum*, is omgekeerd evenredig met de golflengte, ofwel evenredig met de frequentie van het uitgezonden licht. In formule:

$$E = h \times v$$

waarin E de energie, h de *constante van Planck*, en v de frequentie voorstellen. De stralingswet die Planck met deze for-

mule uitrekende, klopte precies met de waarnemingen.

Einstein formuleerde dit in 1905 heel wat radicaler: straling van ongeacht welke golflengte kan *alleen maar bestaan* in veelvouden van Plancks energiepakketjes. En de Fransman prins Louis-Victor de Broglie[1] keerde dit later nogmaals om: *alles* wat een zekere energie heeft, gaat geassocieerd met een golf, waarvan de golffrequentie ook weer door Plancks relatie wordt bepaald. Het quantum dat bij de lichtstralen hoort, vatten we nu op als één van de vele soorten elementaire deeltjes: het *foton*. Bij alle andere soorten deeltjes horen andere soorten golven of krachtvelden, maar daarover later meer.

De merkwaardige gedragingen van elektronen in een atoom, ontdekt en uitgewerkt door de beroemde Deense natuurkundige Niels Bohr, konden worden toegeschreven aan de golfformules van De Broglie. Daarna wist Erwin Schrödinger in 1926 de precieze formulering te geven van de golfvergelijkingen voor Bohrs elektronen. De precisie waarmee alle berekeningen gedaan konden worden, was verbluffend, en weldra bleek dat ook werkelijk de gedragingen van *alle* kleine objecten door de nieuw ontdekte ‘quantumformules’ nauwkeurig werden vastgelegd.

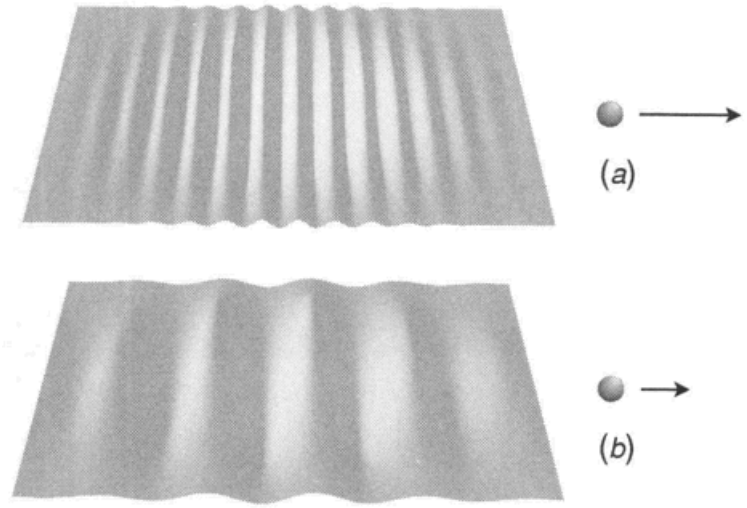
De quantummechanica werkt, dat lijdt geen twijfel meer. Maar een merkwaardige vraag doet zich voor: *wat* stellen de formules nu eigenlijk voor? Toen Isaac Newton in 1687 formuleerde hoe de planeten bewegen om de zon, wist men precies wat de formules betekenden. Planeten zijn altijd maar op één plaats tegelijk en hun plaats en snelheid op één moment zijn bepalend voor hoe plaats en snelheid in de loop der tijd steeds veranderen.

Maar voor elektronen lijkt alles heel anders. Hun gedrag wordt door mystiek omgeven. Elektronen lijken op verschillende plaatsen tegelijk te kunnen zijn. Ze zijn wolkachtig, golfach-

1 Spreek uit: *Debrui'je*

tig, en niet zo'n beetje ook. Als men het experiment maar nauwkeurig uitvoert, kan men vaststellen dat het elektron soms gelijktijdig lijkt te kunnen bewegen over banen die zich op grote afstand van elkaar bevinden. Wat kan dit alles betekenen?

Niels Bohr wist voor zichzelf deze vraag te beantwoorden op een manier waarmee te werken valt. Velen, ook nu nog, zijn er tevreden mee. Het wordt de 'Kopenhaagse interpretatie' van de quantummechanica genoemd. In plaats van te zeggen dat een elektron zich bevindt op een punt *x*, of op een punt *y*, spreken we van een *toestand* van het elektron. We hebben dan niet alleen de toestand '*x*', of een toestand '*y*' waarin het elektron zich kan bevinden, maar ook een toestand 'gedeeltelijk *x* én gedeeltelijk *y*'. Het elektron kan zich gelijktijdig op een heleboel plaatsen bevinden. De quantummechanica zegt nu heel precies hoe zo'n elektrontoestand verandert in de loop der tijd.



Figuur 4. Deeltjes gaan gepaard met golven; deeltjes met veel bewegingsenergie (a) hebben kortere, sneller trillende golven dan deeltjes met minder energie (b).

Een ‘detector’ is een apparaat waarmee de aanwezigheid van een deeltje ergens kan worden vastgesteld. Dit kan een teller zijn, of een lichtgevoelige film, of zelfs het menselijke oog. Als het deeltje de detector tegenkomt, verstoort deze de toestand van het deeltje, dus alleen als we niets meer met het deeltje willen doen mogen we een detector in zijn weg neerzetten. Als we weten wat de quantumtoestand is kunnen we de *kans* uitrekenen dat de detector het deeltje zal registreren. Wordt het deeltje inderdaad op zekere plaats *x* geregistreerd dan zit het deeltje vanaf dat moment[1] in de toestand ‘*x*’.

De natuurwetten in de quantummechanica zijn uiterst precies geformuleerd. Maar willen we deze ‘interpreteren’ dan krijgen we te maken met een merkwaardige, fundamentele *onzekerheid*. Diverse eigenschappen van de kleine deeltjes kunnen niet *gelijktijdig* scherp zijn bepaald. De snelheid van een deeltje en zijn positie in de ruimte bijvoorbeeld. Men kan de snelheid van een deeltje heel precies vastleggen, maar dan weet je niet meer precies waar het zit, of men bepaalt zijn plaats heel precies, maar dan is de snelheid niet goed meer gedefinieerd. Als het deeltje een tolbeweging maakt (het heeft dan ‘spin’), dan kan de richting waarin het draait niet zuiver worden gedefinieerd.

Het is niet gemakkelijk in eenvoudige woorden uiteen te zetten waar deze onzekerheid vandaan komt, maar er is een voor-

1 Dat de toestand waarin een deeltje verkeert ‘verspringt’ doordat het waargenomen wordt, wordt weleens voorgesteld alsof het een apart axioma van de quantummechanica is. In werkelijkheid is dat ‘verspringen’ niets anders dan een sterk vereenvoudigde beschrijving van het ingewikkelde interactieproces dat bij de detectie plaatsvindt. ‘Detectie’ wil zeggen dat afhankelijk van een microscopisch verschijnsel een zeer groot aantal moleculen in de ‘detector’ (zoals in een wijzertje of in de chemische reacties in een fotografische film) in een andere toestand gaan zitten.

beeld uit het dagelijks leven waar we hetzelfde verschijnsel hebben. De *toonhoogte* van een klank en het *moment in de tijd* waarop men de klank hoort, hebben een dergelijke onbepaaldheid. Als men een muziekinstrument wil stemmen, moet men een noot enige tijd laten aanhouden, en bijvoorbeeld vergelijken met een stemvork, die men ook enige tijd moet laten doorklinken. Heel korte noten hebben geen precieze toonhoogte meer. Als men 'tokkelt' op een muziekinstrument, of heel korte staccato noten speelt, dan is niet meer zo goed te horen of het instrument nauwkeurig gestemd is. Dit geldt vooral voor de heel lage noten. We hebben het hier over een fundamentele eigenschap van geluid, die niets met muzikaliteit te maken heeft. U zou kunnen aanvoeren dat een geoefend musicus misschien wél kan horen of een instrument goed gestemd is, zelfs als je er staccato noten op speelt, maar dat komt dan doordat deze het instrument zo goed kent dat hij dit aan de boventonen kan horen; die liggen al preciezer vast.

De rekenregels van de quantummechanica werken, maar wel alleen als *alle* natuurverschijnselen in de wereld van het kleine zich strikt aan de reglementen van de quantummechanica onderwerpen, ook virussen, bacteriën en zelfs mensen. Echter, hoe groter en zwaarder een object, des te moeilijker wordt het de quantummechanische afwijkingen van de gewone 'klassieke' bewegingen nog vast te stellen. Deze merkwaardige en belangrijke eis in de theorie zou ik 'holisme' willen noemen. Dat is dan wel niet helemaal hetzelfde als wat in sommige kringen onder 'holisme' wordt verstaan: de gedachte dat 'het geheel meer is dan de som der delen'. De natuurkunde heeft ons juist het tegendeel geleerd: het geheel kan wel degelijk begrepen worden als de som der delen, als je de optelling maar goed doet (en dat is niet zo eenvoudig in de quantummechanica!). Wat ik onder holisme versta, is dat het geheel alleen uit delen mag bestaan die alle volgens eendere wetten bewegen. Bijvoorbeeld: de constante van Planck, $h = 6{,}626068... \times 10^{-34}$ Js, moet voor alle systemen exact dezelfde zijn.

De quantummechanische rekenregels werken. Zo goed zelfs dat het moeilijk wordt er iets tegen in te brengen. Door geniale vondsten van Werner Heisenberg, Paul Dirac en vele anderen werden de voorschriften verder verfijnd en verfraaid. Maar Einstein, en ook anderen van het eerste uur zoals Schrödinger, hadden grote bezwaren tegen deze interpretatie. Het mocht dan wel zo zijn dat zij werkt, maar waar zit het elektron nu, in het punt *x* of het punt *y*? Kortom, wat is de *realiteit* van het elektron? Hoe ziet nu de 'werkelijkheid' eruit die achter deze theorie verborgen blijft? Volgens Bohr is het nutteloos verder te zoeken naar zo'n vermeende werkelijkheid. De quantummechanische bewegingsvergelijkingen, en de feitelijke waarnemingen aan een detectieapparaat, zijn de enige werkelijkheden waarover we mogen praten.

Ook nu zijn de meeste onderzoekers het eens met de pragmatische houding van Bohr. Toch zou naar mijn mening Einstein nog wel eens gelijk kunnen krijgen. Er ontbreekt iets aan de Kopenhaagse interpretatie. Maar steekhoudende bezwaren zou men pas kunnen aanvoeren als we de quantummechanica van het hele universum willen formuleren, én als we de quantummechanische wetten op de zwaartekrachtsverschijnselen willen loslaten. En zover ben ik nog lang niet met mijn verhaal (ik kom hier pas in hoofdstuk 28 en verder op terug). Voor een correcte beschrijving van atomen en moleculen is de quantummechanica mét haar Bohrse interpretatie de aangewezen theorie.

Het geheimzinnige, ongrijpbare van de quantummechanica heeft heel wat pennen in beweging gezet, en de hoeveelheid onzin die er wordt beweerd is zo groot dat het onbegonnen werk is daar als nuchtere fysicus tegenin te gaan. Zo zou het leven op aarde ontstaan zijn uit dode materie 'door een quantumsprong'; onze 'vrije wil' en ons 'bewustzijn' zouden we te danken hebben aan de quantummechanica. Paranormale verschijnselen zouden zelfs aan de willekeur van de quantummechanische wetten toe te schrijven zijn.

Ik heb sterk de indruk dat men dan probeert ‘onbegrijpelijke’ verschijnselen aan ‘onbegrijpelijke’ oorzaken (dus quantummechanica) toe te schrijven. Maar quantummechanica is helemaal niet onbegrijpelijk. Uit de quantummechanica zelf kunnen we de tegenargumenten putten. Het eerder genoemde ‘holistische’ karakter van de quantummechanica houdt in dat de uitkomst van een berekening *altijd* een *kans* of *waarschijnlijkheid* is. Als een experiment vele malen herhaald wordt, zal een zeker percentage van de uitkomsten zus zijn, en een ander percentage zó. Hoe vaker men een experiment herhaalt, hoe nauwkeuriger de percentages zullen kloppen met de berekening uit de quantummechanische wetten. Dat zou ook gelden voor ‘het ontstaan van leven’, een ‘uit vrije wil genomen beslissing’ of een ‘paranormale ervaring’, als het mogelijk was geweest deze verschijnselen vanaf hun atomaire bouwstenen uit te rekenen. Deze zou je namelijk óók als ‘experimenten’ kunnen opvatten. Niet alleen kunnen wij mensen dit soort verschijnselen uiteraard nooit vanuit de fundamentele natuurwetten doorrekenen, omdat de berekening hopeloos lang zou zijn en omdat we de beginsituatie nooit nauwkeurig genoeg kennen, maar er is ook geen enkele soort hersencel of chemische reactie denkbaar die zeg maar ‘paranormale’ berekeningen zou kunnen verrichten. De uitkomsten van die berekeningen zouden altijd een waarschijnlijkheidsverdeling hebben in overeenkomst met de wetten van de quantummechanica. Het ontstaan van leven, en het functioneren van onze hersenen, volgen precies de kansverdelingen zoals gedicteerd door de quantummechanica.

Heel veel mensen hebben een diepgewortelde behoefte aan mystiek[1], en de quantummechanica lijkt op het eerste gezicht

1 In de Van Dale wordt ‘mystiek’ omschreven als een godsdienstige ervaring, maar het bijvoeglijk naamwoord betekent: ‘raadselachtig’, ‘duister’. Het is het beste woord dat ik kan vinden voor de acceptatie van strikt irrationele omschrijvingen en argumenten, ook al hoeven deze niet religieus van aard te zijn.

aan die behoefte te voldoen. Bij mij is dat niet het geval. De quantummechanica is een sluitende theorie voor de atomaire krachten en bewegingen. Natuurkundigen zouden het als hun taak moeten zien tegen mysticisme ten strijde te trekken, maar velen van ons zijn daar niet zo handig in. Zo gebruikte Niels Bohr het bekende yin-yangfiguurtje om het beginsel van de complementariteit in de quantummechanica te symboliseren (het feit dat je een deeltje soms als golf, soms als deeltje moet zien). Hij bedoelde er *niet* mee dat we ons nu moeten wenden tot de oosterse mystiek om door middel van meditatie en navelstaren tot diepere inzichten in de mysteriën van de quantummechanica te geraken, zoals sommigen ons willen doen geloven.

Ik geloof dat ik de werkelijke situatie vrij eenvoudig kan samenvatten. De uitkomst van in principe ieder experiment kan door middel van onze huidige kennis van de natuurwetten worden voorspeld in die zin dat de voorspelling is opgebouwd uit twee ingrediënten. De ene volgt volledig eenduidig bepaalde voorschriften, en de andere volgt een mathematisch onvermurwbare, statistische willekeur. Op nogal ingewikkelde wijze bijeengevoegd leveren deze de voorspelling voor de uitkomst van een experiment. Deeltjes gaan met een berekenbare waarschijnlijkheidsverdeling nu eens de ene en dan weer de andere kant op.

Met waarschijnlijkheid en statistiek wordt, helaas ook door sommige natuurkundigen, uiterst vreemd omgesprongen. Zo vermoeden sommigen dat al die min of meer waarschijnlijke mogelijkheden in ‘parallelle werelden’ gerealiseerd zijn (de ‘many worlds’-interpretatie van de quantummechanica). Onzin, naar mijn overtuiging. Veel meer voor de hand ligt dat de statistische component in de voorspellingen uiteindelijk hele-

maal zal verdwijnen als we de *volledige theorie van alle krachten* kennen. Dit laatste betekent dat men kan vermoeden dat er variabelen en krachten in het spel zijn die wij (nu nog) niet kennen en begrijpen. Deze interpretatie heet ‘de hypothese van de verborgen variabelen’.

Er zijn talloze pogingen gedaan deze gedachte uit te werken in wiskundige modellen. Toen dat niet lukte, deden de natuurkundigen datgene wat ze in zulke omstandigheden altijd doen: bewijzen dat het onmogelijk is. Zo bedachten Albert Einstein, Nathan Rosen en Boris Podolsky een gedachte-experiment waarvan de quantummechanica een uitkomst voorspelde die door geen enkele verborgen-variabelentheorie zou kunnen worden voortgebracht. Later zou de Ierse natuurkundige John Bell deze onmogelijkheid tot een wiskundig theorema verheffen. Als je uitgaat van schakelaartjes en radertjes die allemaal volgens eenduidige voorschriften bewegen, kun je nooit een universum bedenken waarin we quantummechanische verschijnselen zien, zo stelde Bell. We noemen zoiets een ‘gaat-niet-stelling’ (‘no-go-theorem’).

Toch zult u begrepen hebben dat ik nog steeds in de verborgen variabelen geloof. Ongetwijfeld zit de zaak zodanig in elkaar dat enige aannames, die voor Einstein, Bell en anderen vanzelfsprekend leken, niet geldig zullen blijken. Maar hoe het wel moet weet ik niet. In ieder geval is het bestaan van verborgen variabelen als ‘werkhypothese’ nog steeds de meest bruikbare. En wat de ‘gaat-niet-stelling’ betreft, we zullen er nog verscheidene tegenkomen en hun lot bespreken.

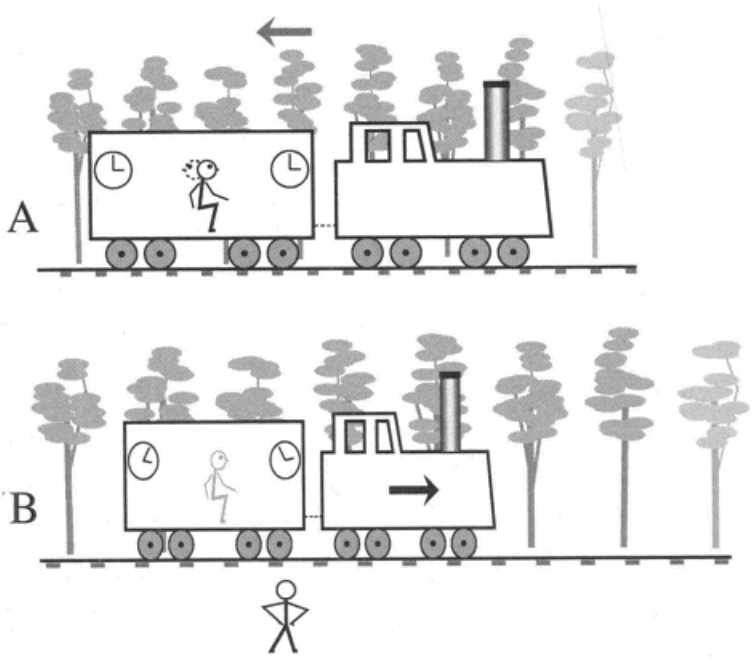
4 Duizelingwekkende snelheden

Honderdduizend keer zo klein als het atoom zelf is het harde pitje dat er midden in zit: de atoomkern. Door zijn massa, maar nog meer door zijn elektrische lading bepaalt het alle eigenschappen van het atoom. Door de ongenaakbaarheid van de atoomkernen lijken de atomen die onze dagelijkse wereld opbouwen onveranderlijk, ook als ze onderlinge interacties aangaan waarbij ze de scheikundige verbindingen vormen. Maar wat onbreekbaar lijkt, kán wel stuk. Als atomen met duizelingwekkende snelheden op elkaar afstormen kan het gebeuren dat de kernen elkaar raken, en dan kunnen deze uiteenspatten of samensmelten. Er komen dan *subatomaire deeltjes* vrij. De nieuwe natuurkunde van de eerste helft van de twintigste eeuw werd beheerst door de nieuwe raadsels waar deze deeltjes ons mee opscheepten.

Maar we hebben toch de quantummechanica, zult u zeggen, en die is toch overal van toepassing? Wat was dan de moeilijkheid? Inderdaad, de quantummechanica is zeker van toepassing op de subatomaire deeltjes, maar er is meer. De krachten waarmee deze deeltjes op elkaar inwerken en die de atoomkernen bij elkaar houden zijn zo groot dat de snelheden waarmee ze om elkaar bewegen in en buiten die kernen, in de buurt komen van de lichtsnelheid, ongeveer 300.000 km/sec. Wanneer zulke snelheden een rol spelen is er een tweede wijziging nodig in de natuurwetten van de negentiende eeuw: dan hebben we rekening te houden met de *speciale relativiteitstheorie* van Albert Einstein.

Ook dit is een resultaat van een publicatie door Einstein in 1905. Zijn uitgangspunt was dat een experiment uitgevoerd in een laboratorium in de vrije ruimte uitkomsten moet geven die er niet van afhangen hoe snel en in welke richting het laboratorium zich in de ruimte beweegt, ook niet als men in dat labora-

torium de snelheid van het licht meet. Dat is vreemd, want stel dat het laboratorium zich in een ruimteschip bevindt dat een snelheid heeft van 50.000 km/sec. Dan zou je verwachten dat de waargenomen lichtsnelheid in één richting 350.000 km/sec zal bedragen en in de tegenovergestelde richting slechts 250.000 km/sec. Ook in de loodrechte richtingen zou je een kleine afwijking verwachten.



Figuur 5. Volgens Einsteins speciale relativiteitstheorie hangt de wijze waarop wij lengte en tijd waarnemen af van waar wij ons bevinden en hoe wij zelf bewegen. Iemand die zich in een rijdende trein bevindt (a) kan zijn klokken hebben gelijkgezet en de lengte van de trein hebben gemeten. De waarnemer buiten (b) zal vinden dat diezelfde klokken niet gelijk lopen en dat de trein wat korter lijkt, terwijl voor hem de bomen wat verder uit elkaar staan.

Echter, zo'n experiment is afhankelijk van het bestaan van goede klokken en lengtemetingen. Bovendien moeten diverse klokken gelijkgezet worden. Dat klokken en linialen heel goed door de snelheid van het laboratorium beïnvloed zouden kunnen worden, was al in 1893 geopperd door de Nederlander Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), en onafhankelijk van hem door de Ier G.F. Fitzgerald. In Nederland is Lorentz overigens ook om andere redenen bekend geworden: hij was voorzitter van de Zuiderzeecommissie, die de waterstromingen moest uitrekenen welke zouden ontstaan als er ergens een afsluitdijk zou worden aangelegd. In aanmerking nemend dat er toen nog geen computers bestonden, bleken zijn berekeningen later opmerkelijk nauwkeurig te zijn.

Lorentz dacht echter nog in termen van stilstaande en bewegende linialen; ten gevolge van hun beweging zouden linialen kunnen krimpen. Einstein was het die zich realiseerde dat hierdoor stilstand en beweging alle *relatief* zijn geworden. Er bestaat niet zoiets als absolute rust, of een absoluut referentiepunt ten opzichte waarvan men de lichtsnelheid kan meten.

Er moest nog veel meer relatief worden. *Massa* en *energie* hangen nu ook van de snelheid af, en tevens elektrische en magnetische veldsterkte. Einstein ontdekte dat de massa van een deeltje altijd evenredig is met zijn energie, als je daarbij een zeer grote hoeveelheid ‘rustenergie’ optelt. Deze rustenergie is evenredig met de massa van het deeltje als het in rust verkeert:

$$E = M \times c^2$$

Hierin is E de energie, M de massa en c de snelheid van het licht.

Mede door deze voorspelling, dat in kleine deeltjes enorme hoeveelheden energie opgeslagen moeten zitten, werd de rela-

tiviteitstheorie voor de natuurkunde (en voor de samenleving!) erg belangrijk. Ook voor deze theorie geldt dat zij alleen maar werkt als zij ‘holistisch’ is: alles en iedereen moet onderworpen zijn aan de relativiteit van beweging. Niet alleen klokken gaan anders lopen wanneer men ze grote snelheden geeft, ook alle andere levenloze en levende mechanismen zoals het menselijke hart. Anders zou de experimentator immers *wel* de absolute snelheid waarmee zijn laboratorium beweegt kunnen vaststellen!

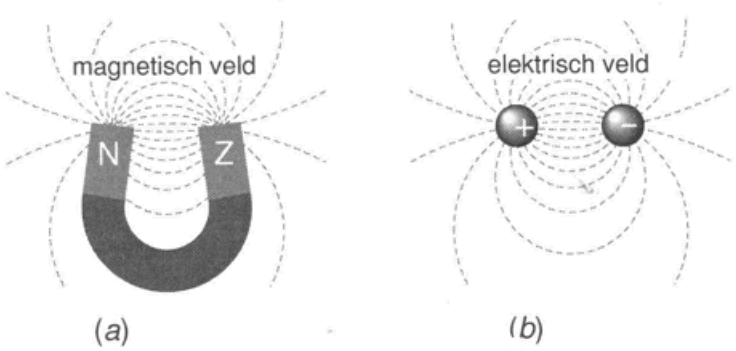
Einstein zag snel in dat daarom ook de wetten van de *zwaartekracht* aangepast moesten worden aan het relativiteitsbeginsel. Nu herinnert u zich dat voor kleine objecten de zwaartekracht een zeer ondergeschikte rol speelt. Voor de subatomaire deeltjes is de zwaartekracht verschrikkelijk zwak. Voor ons verhaal doet de zwaartekracht er dus niet veel toe. Toch zal ik later in dit boek weer tegen deze merkwaardige en uiterst fundamentele kracht aanlopen. Het probleem waarvoor Einstein zich geplaatst zag zou ook belangrijk zijn voor het begrijpen van andere krachten tussen de kleine deeltjes. Daarom vermeld ik nu vast waar hij, pas na tien jaar, de oplossing vond.

Teneinde het relativiteitsbeginsel van toepassing te doen zijn op de zwaartekracht moest het principe worden uitgebreid. Niet alleen de eigen snelheid van een laboratorium is niet meer te achterhalen, ook *veranderingen* in die snelheid niet; die zijn niet te onderscheiden van de invloeden van zwaartekrachtsvelden.

Het gevolg hiervan was dat de zwaartekracht met ruimte en tijd hetzelfde doet als wat vocht doet met een stuk glad papier: er komen bobbels en rimpels in, die niet meer zijn glad te strijken. De wiskunde van gekromde ruimtes bleek reeds bekend te zijn, maar het toepassen van zulke abstracte wiskunde voor het formuleren van de natuurwetten was in Einsteins tijd iets geheel nieuws, en het duurde verscheidene jaren voordat hij er vertrouwd mee was. Nu, driekwart eeuw later, vinden natuur-

kundigen het heel gewoon te flirten met uiterst geavanceerde wiskunde. Ook nu geldt echter nog dat vaak niet de wiskunde zelf het moeilijkste probleem is; het vinden van de *juiste* wiskundige benadering voor nieuwe theorieën, dat is meestal de moeilijkste schakel.

Einsteins theorie voor de zwaartekracht noemen we de *algemene relativiteitstheorie*. We komen erop terug, eerst omdat deze theorie als voorbeeld zal dienen voor andere theorieën voor fundamentele krachten, en ten slotte omdat voor objecten die *nog veel kleiner* zijn dan de subatomaire deeltjes de zwaartekracht weer een rol kan gaan spelen. Maar voorlopig kunt u de zwaartekracht en de algemene relativiteitstheorie weer vergeten. We gaan eerst de subatomaire deeltjes bespreken.



Figuur 6. Volgens de vergelijkingen van Maxwell vormen de magnetische veldlijnen bij een magneet hetzelfde patroon als de elektrische veldlijnen bij twee tegenovergestelde elektrische ladingen.

De elektromagnetische kracht

De elektrische kracht is de kracht waarmee twee elektrisch geladen deeltjes elkaar afstoten (als ze gelijke ladingen hebben), of elkaar aantrekken (als de ladingen een tegengesteld teken hebben).
De magnetische kracht is de kracht die een *snel bewegend* elektrisch geladen deeltje ondervindt in een magneetveld. Een magneetveld ontstaat als elektrisch geladen deeltjes snel bewegen, bijvoorbeeld als ze door de wikkelingen van een spoeltje stromen.
James Clerk Maxwell slaagde er in 1873 in de volledige vergelijkingen voor de elektrische en magnetische krachtvelden op te schrijven. Het werd een 'geünificeerde' theorie, die nu elektromagnetisme genoemd wordt. Zie figuur 6, blz. 35.
Kenmerkende eigenschappen van deze kracht, zoals ze op de elementaire deeltjes inwerkt, zijn:

- De kracht grijpt op universele wijze aan op *elektrische lading*.
- De kracht heeft een zeer grote reikwijdte (magnetische velden kunnen de enorme afstanden tussen sterren overbruggen).
- De kracht is *vrij zwak*. Bepalend voor de sterkte is de verhouding tussen het kwadraat van de lading van een elektron en $2hc$ (2 × de constante van Planck maal de lichtsnelheid). Deze verhouding is ongeveer 1 : 137, 036.
- De 'drager' van de kracht is het foton, een deeltje met massa 0 en spin[1]. Het foton heeft zelf geen elektrische lading.

Algemeen is de reikwijdte van een kracht omgekeerd evenredig met de massa van zijn drager.

1 Het begrip 'spin' wordt in het volgende hoofdstuk verder toegelicht.

De zwaartekracht

De zwaartekracht is een zeer fundamentele kracht waarvan Einstein in 1915 de gedetailleerde structuur wist te ontrafelen, en die hij in verband bracht met kromming in ruimte en tijd. Echter ook nu nog weten wij niet hoe deze wetten te verenigen zijn met de wetten van de quantummechanica.

- De zwaartekracht grijpt uitsluitend aan op de *massa* van de deeltjes.
- De kracht heeft een zeer grote reikwijdte (werkt door tot de verste uithoeken van het heelal).
- De kracht is zo uiterst zwak dat het wel nooit mogelijk zal zijn direct de zwaartekrachtswerking tussen twee elementaire deeltjes onderling experimenteel te detecteren. De kracht merken wij alleen doordat deze *collectief* is: alle deeltjes trekken dezelfde kant op.
- De drager is het hypothetische ‘graviton’. Hoewel nog nooit ontdekt, weten we wat de quantummechanica erover zal zeggen: het heeft massa 0 en spin 2.

Een algemene wet voor alle krachten is dat als de drager even spin heeft, de kracht tussen twee gelijksoortige ladingen aantrekkend is en tussen tegengestelde ladingen afstotend. Heeft de drager oneven spin dan is dit andersom.

5 De dierentuin van elementaire deeltjes vóór 1970

Op onze reis naar het kleine zijn we nu de atomen gepasseerd. Het zijn grote, logge en tere objecten vergeleken met waar we ons nu mee gaan bezighouden: de atoomkern en wat daar zoal in zit. Ook de elektronen, die 'op grote afstand' eromheen cirkelen, zijn zelf heel klein en uiterst robuust. Ik nodig u nu uit een kijkje te nemen in die kern, met de ogen van de natuuronderzoeker van vóór 1970. Zelf beschouw ik de tijd rond 1970 als een zeer belangrijke periode, maar dit jaartal kies ik nu ook omdat het de tijd was waarop ik zelf kennismaakte met de deeltjesfysica, als jonge promovendus aan de Rijksuniversiteit te Utrecht.

Alle natuurkunde die ik hiervoor genoemd heb (en natuurlijk nog veel meer) was basisleerstof voor studenten in de theoretische fysica. Ook omtrent de opbouw van de atoomkern was al heel veel bekend. Je kunt deze opgebouwd denken uit een tweetal soorten bouwstenen: *protonen* en *neutronen*. Het proton (Grieks πρῶτο□ = eerste) dankt zijn naam aan het feit dat de eenvoudigste atoomkern, die van waterstof, uit louter één proton bestaat. Het draagt één eenheid positieve elektrische lading. Het neutron is een deeltje dat als twee druppels water lijkt op het proton: zijn massa is praktisch dezelfde, de elektrische lading ontbreekt: het is neutraal.

De meeste atoomkernen bevatten wat meer neutronen dan protonen. Nu zouden de protonen, zo dicht op elkaar gepakt in die atoomkern, elkaar vanwege hun elektrische lading flink hard moeten afstoten. De kracht die ze desondanks stevig bij elkaar houdt is echter veel sterker dan de elektrische afstotingskracht. Het is de zogenaamde *sterke kracht*.

Zoals het licht gequantiseerd is in 'fotonen' (zie hoofdstuk 3), zo is ook de sterke kracht gequantiseerd. Van het bijbehorende deeltje konden in 1934 de eigenschappen worden voorspeld

door de Japanner Hideki Yukawa. We zouden dit deeltje later het *pion* noemen. Er is een heel belangrijk verschil tussen pionen en fotonen. Een pion is een brokje materie met een zekere hoeveelheid ‘massa’. Als dit deeltje in rust verkeert is deze massa altijd dezelfde, namelijk de ‘rustmassa’, ongeveer 140 MeV (zie de tabel op blz. 40-41). Als het hard beweegt wordt deze massa groter. In tegenstelling hiermee zeggen we dat het foton een rustmassa nul heeft. Hiermee bedoelen we niet dat de wérkelijke massa van het foton nul is, maar dat het foton nooit in rust kan verkeren. Het beweegt zich (net als alle andere ‘massaloze’ deeltjes) voort met de snelheid van het licht, ongeveer 300.000 km/sec, een snelheid die het pion nooit helemaal bereiken kan, want dat zou oneindig veel bewegingsenergie kosten. Bij het foton is alle massa toe te schrijven aan bewegingsenergie.[1]

Het pion is wel lichter dan het proton en het neutron, maar zwaarder dan het elektron (zie de tabel). Er zijn drie soorten pionen: één is positief elektrisch geladen, één negatief en één is neutraal. Als protonen en neutronen met voldoende energie tegen elkaar aan botsen komen er meestal pionen vrij. Dit is vergelijkbaar met wat er gebeurt als we gewone atomen in beweging brengen zodat ze veelvuldig tegen elkaar gaan botsen. Dat gebeurt namelijk als je materie *verwarmt*. De atomen gaan dan licht (fotonen) uitzenden. Op een tienduizend keer zo kleine schaal kunnen atoomkernen hetzelfde doen. Als ze heftig gaan bewegen in een sterk krachtveld morsen ze pionen.

De ontdekking van het pion ging overigens niet van een leien

1 Over hoe we ‘massa’ van een bewegend deeltje moeten definiëren heersen meningsverschillen. Sommige van mijn collega's willen het begrip ‘massa’ reserveren voor wat ik hier ‘rustmassa’ heb genoemd. Over hoe we met de theorie moeten werken bestaat echter geen meningsverschil.

naam	*symbool*	*massa (MeV)*[2]	*lading*	*spin*	*levensduur (sec)*	*voornaamste vervalwijze*	*S, I_3*
foton	γ	0	0	1	∞	stabiel	
leptonen($L=1, B=0$):							
elektron	e^-	0,5109989	–	½	∞	stabiel	
muon	μ^-	105,658356	–	½	$2{,}1970\times10^{-6}$	$e+\bar{\nu}_e+\nu_\mu$	
e-neutrino	ν_e	~0	0	½	$\sim\infty$	stabiel	
μ-neutrino	ν_μ	$\sim10^{-11}$	0	½	$\sim\infty$	stabiel	
mesonen($L=0, B=0$):							
positief pion	π^+	139,570	+	0	$2{,}603\times10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$	0,1
negatief pion	π^-	139,570	–	0	$2{,}603\times10^{-8}$	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$	0,-1
neutr. pion	π^o	134,976	0	0	$0{,}84\times10^{-16}$	2γ	0, 0
positief kaon	K^+	493,68	+	0	$1{,}237\times10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu; \pi^+ + \pi^o; 3\pi$	1, ½
negatief kaon	K^-	493,68	–	0	$1{,}237\times10^{-8}$	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu; \pi^- + \pi^o; 3\pi$	-1, -½
K-lang	K_{lang}	497,7	0	0	$5{,}17\times10^{-8}$	$3\pi^o; \pi^+ + \pi^- + \pi^o$	±1, ±½
K-kort	K_{kort}	497,7	0	0	$0{,}894\times10^{-10}$	$2\pi^o; \pi^+ + \pi^-$	±1, ±½
èta	η	547,3	0	0	$5{,}5\times10^{-19}$	$3\pi; 2\gamma$	0, 0

Tabel 1. De elementaire deeltjes met levensduur langer dan 10^{-20} seconde, zover bekend in 1970[1]

2

1 Bij ieder *lepton* en ieder *baryon* correspondeert nog een *antideeltje*. De antideeltjes hebben dezelfde massa als de deeltjes, maar hun elektrische lading en de quantumgetallen *L* en *B* zijn tegengesteld. De neutrale *mesonen* zijn hun eigen antideeltje. π^+ en π^- zijn elkaars antideeltje, net als K^+ en K^-. Het symbool voor een antideeltje is als dat van het deeltje, met een streep erboven. (massa's en levensduur gecorrigeerd volgens de tabellen van 2000. Voor uitgebreide gegevens, zie Particle Data Group van CERN, wwwpdg.cern.ch/pdg/).

2 Een MeV ('Mega-elektron-Volt') is de hoeveelheid bewegingsenergie die een enkelvoudig elektrisch geladen deeltje opdoet als het een spanningsverschil van één miljoen volt doorloopt. Doordat deze energie ook in massa wordt omgezet, is de MeV een handige maat voor massa van een klein deeltje.

baryonen ($L = 0, B = 1$):								
proton	p	938,2720	+	½	∞		stabiel	0, ½
neutron	n	939,5653	0	½	886		$p + e + \bar{\nu}_e$	0, -½
lambda	Λ	1115,68	0	½	2,63	$\times 10^{-10}$	$p + \pi^-; n + \pi^o; p + e^- + \bar{\nu}_e$	-1, 0
sigma-plus	Σ^+	1189,4	+	½	0,81	$\times 10^{-10}$	$p + \pi^o; n + \pi^+$	-1, 1
sigma-nul	Σ^o	1192,6	0	½	7,4	$\times 10^{-10}$	$\Lambda + \gamma$	-1, 0
sigma-min	Σ^-	1197,4	–	½	1,48	$\times 10^{-10}$	$n + \pi^-; n + e^- + \bar{\nu}_e$	-1, -1
ksi-nul	Ξ^o	1314,9	0	½	2,9	$\times 10^{-10}$	$\Lambda + \pi^o$	-2, ½
ksi-min	Ξ^-	1321,3	–	½	1,64	$\times 10^{-10}$	$\Lambda + \pi^-; \Lambda + e^- + \bar{\nu}_e$	-2, -½
omega-min	Ω^-	1672,4	–	½	0,82	$\times 10^{-10}$	$\Lambda + K^-; \Xi^o + \pi^-; \Xi^o + e^- + \bar{\nu}_e$	-3, 0

dakje. In de tijd dat men dit soort deeltjes nog niet zelf kon maken, werden de atomaire brokstukken bestudeerd die gratis op ons worden afgevuurd vanuit de verten van het heelal en die ‘kosmische stralen’ werden genoemd. Toen men sporen van kosmische stralen onderzocht om de eigenschappen te bepalen van de deeltjes die zich daaronder bevinden, trof men inderdaad iets aan waarvan de massa vrij aardig klopte met de voorspelling van Yukawa. Het werd het *meson* (Grieks μέσο□ = midden) genoemd, omdat de massa tussen die van het elektron en het proton in ligt. Zo had Yukawa zijn voorspelde deeltje ook genoemd. Tegenwoordig gebruikt men voor het toen waargenomen deeltje alleen nog maar de afkorting μ ofwel *muon*. Er was namelijk te veel dat niet klopte. Het muon doet helemaal niet mee met de sterke interacties, en kon daarom onmogelijk het voorspelde pion zijn.

We weten nu hoe het muon in de kosmische stralen terecht komt. Hoog in de atmosfeer botsen atomen van diep uit de kosmos met enorm veel energie tegen de moleculen uit de atmosfeer. Er worden dan onmiddellijk vele pionen geproduceerd, geheel in overeenstemming met Yukawa's theorie. Maar wat Yukawa niet weten kon is dat pionen niet stabiel zijn. Ieder pion valt binnen een fractie van een tienmiljoenste seconde uiteen, vaak in een muon en een *neutrino* (een ander exemplaar uit de deeltjesdierentuin). Het neutrino blijft meestal onopgemerkt, maar de muonen bereiken de lagere delen van de atmosfeer en zijn zelfs tot honderden meters onder de grond nog detecteerbaar.

Toen deze zaak eindelijk duidelijk was geworden, wist Isidore I. Rabi[1] de reactie van de wetenschappelijke wereld op de

1 Rabi was de ontdekker van de magnetische kernspinresonantie, die ten grondslag ligt aan de moderne technieken waarmee men vlijmscherpe opnamen kan maken van het inwendige van organen, zonder schadelijke röntgenstralen te hoeven gebruiken. Hij was ook een van de grondleggers van het Europese deeltjeslaboratorium CERN te Genève.

komst van het muon aardig samen te vatten met de uitroep: ‘Who ordered *that*?’ (‘Wie heeft *dat* nou besteld?’). Ook met onze huidige kennis van de elementaire deeltjes zou het muon niet echt te voorspellen zijn geweest. In ieder geval heeft nog steeds niemand een steekhoudende theorie die vertelt waarom er muonen bestaan, laat staan een theorie die vertelt hoe de massa van het muon (ongeveer 200 maal de elektronmassa) uitgerekend zou moeten worden.

En er kwam nog meer dat niet besteld was. Hoog in de atmosfeer ontdekte men niet alleen pionen. De *kaonen* waren deeltjes die zwaarder zijn dan de pionen maar er verder nogal op lijken. Er was heel wat pionierswerk, onder andere door de Nederlander Abraham Pais, nodig geweest om deze deeltjes in kaart te brengen. Heel mysterieus gedroegen zich allerlei deeltjes die allemaal elektrisch neutraal waren en een massa hadden in de buurt van de 500 MeV. Deze deeltjes konden op verschillende manieren ontstaan en op verschillende manieren uiteenvallen. Dat het ten slotte om slechts twee soorten ging, K_{lang} en K_{kort}, lag eerst allerminst voor de hand. In een volgend hoofdstuk vertel ik u wat er aan de hand is met deze *K*-deeltjes.

Een kenmerkende eigenschap van de kleine deeltjes is dat ze kunnen ronddraaien om hun eigen as. Net als tennis- en biljartballen hebben ze *spin*. Maar er is een belangrijk verschil met tennis- en biljartballen: de mate van spinbeweging ligt voor ieder deeltje vast. De *spin* (preciezer: het impulsmoment, ruwweg massa × straal × draaisnelheid) kunnen we meten in veelvouden van de constante van Planck gedeeld door 2π. In deze eenheden gemeten moet, volgens de quantummechanica, de spin van ieder object altijd hetzij een geheel getal zijn, hetzij ‘halftallig’, dat wil zeggen een geheel getal plus ½.

Het elektron, bijvoorbeeld, heeft spin ½. Dit is in 1925 ontdekt door de Nederlanders Samuel Goudsmit (1902-1978) en George Uhlenbeck (1900-1988), die in juli 1927 gezamenlijk op dit onderwerp promoveerden. Het was een gedurfd idee dat

deeltjes die zo klein zijn als het elektron toch nog kunnen rondtollen, en nog wel zo hard. Want voor zo'n klein deeltje is spin ½ een heel grote hoeveelheid draaibeweging. Het oppervlak van een elektron zou minstens 137 maal zo snel moeten bewegen als het licht. Het idee werd dus aanvankelijk met de nodige argwaan begroet. Tegenwoordig negeert men zulke bezwaren gewoon, want er bestaat niet zoiets als het oppervlak van een elektron.

De draaias van het foton en de neutrino's is altijd evenwijdig aan de voortbewegingsrichting. De andere deeltjes hebben hun draaias in een willekeurige richting. Het zal overigens altijd moeilijk blijven de draaibeweging, of spin, van onze kleine deeltjes in gewone woorden te beschrijven. De quantummechanica maakt het onmogelijk de *richting* van de draaias nauwkeurig vast te leggen. Alleen voor objecten waarvan de spin groot is kan ook de spinrichting nauwkeurig worden gedefinieerd.

De deeltjes met heeltallige spin noemen we ‘bosonen’, die met halftallige spin ‘fermionen’. U ziet in tabel 1 dat de deeltjes die we ‘leptonen’ noemen en die welke we ‘baryonen’ noemen fermionen zijn en de andere bosonen. In allerlei opzichten blijken de fermionen zich heel anders dan de bosonen te gedragen. Fermionen hebben de eigenschap dat ze ieder voor zich hun eigen plaatsje in de ruimte opeisen. Twee fermionen van hetzelfde type mogen nooit op dezelfde plaats zitten. Hun bewegingsvergelijkingen zijn zodanig opgesteld dat ze elkaar altijd mijden. Merkwaardig genoeg is daar geen kracht voor nodig. Er kunnen aantrekkende of afstotende krachten heersen tussen fermionen. Het verschijnsel dat fermionen nooit met meer dan één op dezelfde plaats mogen zitten, heet het *uitsluitingsprincipe van Pauli*. Elektronen zijn fermionen (spin ½). Nu is ieder atoom omgeven met een wolk van elektronen. Als twee atomen te dicht bij elkaar in de buurt komen, bewegen de elektronen zodanig dat de twee wolken elkaar mijden. Dit levert een afsto-

De zwakke kracht

De zwakke kracht is er verantwoordelijk voor dat vele deeltjes en ook vele atoomkernen instabiel zijn. De zwakke kracht kan deze deeltjes doen overgaan in een ander deeltje onder uitzending van een elektron (of positron) en een neutrino. In de jaren zestig hadden we een formule die voorgesteld was door Enrico Fermi en verder gepreciseerd door Sudarshan, Gell-Mann, Feynman en anderen. Deze formule werkte uitstekend al wisten we wel dat zij op zeer kleine afstand niet meer goed kon zijn.
Op dat moment wisten we als kenmerken van deze kracht te melden:

- De kracht werkt op universele wijze op verschillende deeltjes in; is dus voor verschillende deeltjes even sterk. Alle bekende deeltjes zijn gevoelig voor deze kracht. De neutrino's zijn *uitsluitend* gevoelig voor de zwakke kracht.
- De kracht heeft een uiterst kleine reikwijdte.
- De kracht is zeer zwak. Hierdoor zijn botsingsprocessen waar neutrino's direct bij betrokken zijn zo zeldzaam dat men zeer intensieve neutrinobundels nodig heeft om zulke botsingen te kunnen bestuderen.
- De ‘dragers’ van de zwakke kracht zou men pas in de jaren tachtig vinden, het W^+ en het W^- deeltje. Net als het foton hebben deze spin 1, maar ze zijn elektrisch geladen en zeer zwaar (vandaar de korte reikwijdte van deze kracht).
  Een derde drager, het Z^o, is verantwoordelijk voor een iets andere variant van de zwakke kracht die geen deeltjes doet uiteenvallen: de ‘neutrale stroom’ (veroorzaakt ‘elastische’ botsingen tussen neutrino's en andere deeltjes).

Na 1970 werd de relatie tussen de zwakke kracht en elektromagnetisme duidelijk.

tende kracht op. Als u in uw handen klapt, merkt u dat uw twee handen niet door elkaar heen kunnen. Dit komt (mede) door Pauli's uitsluitingsprincipe voor de elektronen in uw handen.

In contrast met die individualistische fermionen gedragen de bosonen zich juist collectivistisch. Zij zitten graag met vele op dezelfde plaats. Zo geeft een *laser* een bundel licht af waarin zeer veel fotonen exact dezelfde golflengte en bewegingsrichting hebben. Fotonen zijn bosonen, vandaar. We zullen het collectieve gedrag van deeltjes met heeltallige spin nog vaker opmerken.

Er is nog een spelregel waar dit gezelschap van elementaire deeltjes zich aan te houden heeft: bij ieder deeltje correspondeert een *antideeltje*. Antideeltjes hebben dezelfde spin en exact dezelfde massa als de deeltjes, maar de elektrische lading en de getallen S, I_3, L en B die in de tabel worden genoemd (ik zal die straks toelichten) zijn tegengesteld. Zo zijn π^+ en π^- elkaars antideeltje, net als K^+ en K^-. Daarentegen zijn Σ^+ en Σ^- niet elkaars antideeltje. Ze hebben immers beide B = 1 en hun massa's zijn verschillend. De antideeltjes van deze laatste zijn niet apart in de tabel vermeld (zie voetnoot aldaar). Uitzonderingen op deze regel zijn deeltjes zoals π^o en het foton γ. Deze zijn identiek aan hun eigen antideeltje.

Net als het planten- en dierenrijk ging men de waargenomen deeltjes verder in soorten en families onderverdelen. Naast het foton hebben we nu de *leptonen* en de *hadronen*. De laatste zijn onderverdeeld in de *mesonen* en de *baryonen*. Deze indeling hangt direct samen met de verschillende soorten *krachten* welke er heersen tussen de deeltjes. De drie soorten ‘kracht’ die we tegenkomen zijn de ‘sterke kracht’, de ‘elektromagnetische kracht’ en de ‘zwakke kracht’. Als we in deze wereld van de kleine deeltjes over een ‘kracht’ praten, hebben we het niet alleen over iets dat de bewegingen van een deeltje beïnvloedt. Als deeltjes elkaar op wat voor manier dan ook beïnvloeden, dus ook als ze elkaars *identiteit* veranderen, spreken we van een

kracht. Deeltjes kunnen op afstand krachten op elkaar uitoefenen, maar dat gaat dan doordat ze een ander deeltje als een soort boodschapper ernaartoe sturen en vaak ook weer terugontvangen. Die boodschapper noemen we dan het ‘krachtvoerende deeltje’. Ik moet toegeven dat deze woorden mysterieus zullen klinken. In formuletaal kan het allemaal beter, een verzuchting die ik me nog vaker zal laten ontvallen.

Terug nu naar de indeling. De *leptonen* (Grieks λεπτός, = licht, mager, zwak) zijn deeltjes die niet gevoelig zijn voor de sterke kracht. Zij voelen alleen de zwakke kracht en, als ze elektrisch geladen zijn, ook de elektromagnetische kracht. Ze zijn lichter dan de meeste andere deeltjes (hoewel later ook zwaardere familieleden gevonden zouden worden) en hebben voorzover wij weten alle spin ½. Dat betekent dat ze om hun as draaien, maar met de kleinst mogelijke snelheid.

Het bekendste lepton is het elektron. Omdat dit het lichtste elektrisch geladen deeltje is, worden de zware, positief geladen kernen van de atomen bijna automatisch door deze elektronen omringd, zodat de lading geneutraliseerd wordt. Elektronen komen dus in grote hoeveelheden in gewone materie voor. Een metaal is een stof waarin een groot gedeelte van alle elektronen heel erg vrij kunnen rondzwerven. Ze zijn dan verantwoordelijk voor de elektrische geleiding in het metaal.

De neutrino's oefenen uitsluitend zwakke krachten op andere deeltjes uit, en zijn daardoor uiterst moeilijk waar te nemen. Eén neutrino kan duizenden sterren en planeten doorkruisen zonder daarbij afgeremd te worden of van richting te veranderen.

De *hadronen* (Grieks ἁδρός = sterk) reageren wel op de sterke kracht. Dat maakt dat ze veel meer hinder ondervinden van elkaars aanwezigheid. Je kunt zeggen dat ze veel groter zijn dan de leptonen. Twee hadronen die dichter bij elkaar in de buurt komen dan ongeveer een fermi (10^{-13} cm), zullen vrijwel zeker elkaars beweging beïnvloeden of een interactie aangaan. Dat

geldt voor de leptonen helemaal niet. In 1970 was het wel duidelijk dat daarom de hadronen een heel ingewikkelde inwendige structuur moesten hebben, in tegenstelling tot de leptonen die men zich het beste als ‘puntvormig’ kan voorstellen. De hadronen zijn een soort bolletjes gemaakt van een of ander mysterieus materiaal.

De verdere verdeling van de hadronen in *mesonen* en *baryonen* (Grieks βαρύς = zwaar) was oorspronkelijk gebaseerd op de massaverschillen: de mesonen hebben een massa die meestal tussen die van de leptonen en baryonen in ligt. Maar de massa blijkt niet veel met de aard van het deeltje te maken te hebben. Het is beter naar de spin (draaibeweging) van het deeltje te kijken. Is deze heeltallig dan hebben we een meson, halftallige spin is een baryon (of antibaryon). Het belangrijkst is echter dat bij alle deeltjesprocessen het totale aantal baryonen minus het aantal antibaryonen altijd constant blijft. We zeggen dat het ‘baryongetal *B*’ behouden is. $B = 1$ voor baryonen, $B = -1$ voor antibaryonen en $B = 0$ voor mesonen.

Je kunt nog andere soorten ‘ladingen’ verzinnen zodanig dat deze constant blijven bij botsingen tussen hadronen. We spreken dan van een ‘behoudswet’. Eén zo'n lading is ‘vreemdheid’, en geven we aan met de letter *S* (voor ‘strangeness’). De meeste deeltjes hebben één vaste hoeveelheid *S*. Als deeltjes *A* en *B* tegen elkaar botsen en daarbij veranderen in deeltjes *C* en *D*, dan kan dit alleen als de *S* van *A* en *B* samen even groot is als van *C* en *D* samen. Hetzelf de geldt trouwens voor de *energie* van *A* en *B*, en voor de *impuls* (= massa × snelheid). Behoudswetten zoals de wet van behoud van energie, behoud van impuls, en ook behoud van vreemdheid, spelen altijd een zeer belangrijke rol in de deeltjesfysica.

De benaming ‘vreemdheid’ spreekt voor zichzelf: ‘gewone’ deeltjes zoals het proton en de pionen hebben vreemdheid nul. Het was Gell-Mann die ontdekte dat deze grootheid, voor alle deeltjes bij elkaar opgeteld, bij een deeltjesbotsing behouden

blijft, en hij bedacht er het woord ‘vreemdheid’ (strangeness) voor. Een andere behouden grootheid noemen we ‘isospin’, I_3. Dit woord ‘isospin’ klinkt merkwaardig; het vloeit voort uit de wiskundige aard van deze behoudswet die veel doet denken aan behoud van draaibeweging (spin) in de deeltjes. Het is namelijk zo dat het proton en neutron zich vaak gedragen als één soort deeltje dat hetzij de ene, hetzij de andere kant op ronddraait, maar dan rond een draaias die gericht is in een of andere ‘interne’ ruimte (de isospinruimte). Voor u zal dat misschien mysterieus klinken, maar voor de wiskundige levert dit beeld nieuwe verhelderende inzichten in de symmetrieën van deze deeltjes op. Je kunt namelijk in deze interne ruimte de deeltjes ook in andere richtingen laten draaien en je krijgt dan de behouden grootheden I_1 en I_2, maar ik zal niet verder pogen deze hier te bespreken.

We hebben de ladingen vreemdheid en isospin ook in tabel 1 opgenomen. Deze laatste getallen zijn niet behouden wanneer een deeltje uiteenvalt door inwerking van de *zwakke* kracht. Isospin wordt bovendien ook door de elektromagnetische kracht geschonden.

6 Leven en dood

Als we spreken van de levensduur van een deeltje bedoelen we daarmee altijd de *gemiddelde* levensduur. Een deeltje dat niet absoluut stabiel is heeft op ieder moment dezelfde kans dat het uiteenvallen zal. Sommige leven dus langer dan andere, maar de *gemiddelde* levensduur is een karakteristieke eigenschap van een deeltjessoort.

Men hanteert ook weleens het begrip ‘halfwaardetijd’. Als we een groot aantal identieke deeltjes hebben, is de halfwaardetijd de tijd die het duurt totdat de helft van deze deeltjes is uiteengevallen. De halfwaardetijd is 0,693 maal de gemiddelde levensduur.

U ziet in de tabel dat sommige deeltjes een veel langere gemiddelde levensduur hebben dan andere. De vervalstijden lopen enorm uiteen. Het neutron leeft meer dan tien biljoen keer zo lang als het sigma-plus, en het sigma-plus leeft meer dan een miljard keer langer dan het sigma-nul. Maar als je bedenkt dat hun ‘natuurlijke’ tijdsschaal (de snelheid waarmee hun quantummechanische bewegingen verlopen) ongeveer 10^{-24} seconden is, kun je gerust stellen dat al deze deeltjes zeer stabiel zijn. In het vakjargon heten zij dan ook ‘stable particles’.

Hoe wordt de levensduur van een deeltje bepaald? Deeltjes die nogal lang leven, zoals het neutron en het muon, moeten worden opgevangen, liefst in groten getale, waarna men het verval elektronisch detecteert. Het neutron laat zich niet gemakkelijk vangen, zodat nauwkeurige leeftijdsbepaling daarvan heel moeilijk is.

Deeltjes met een levensduur in de buurt van 10^{-10} tot 10^{-8} seconden werden vroeger in een *bellenvat* geregistreerd; tegenwoordig gebeurt dit vaak in een *dradenkamer*. In een bellenvat laat een langsschietend elektrisch geladen deeltje een spoor van belletjes achter, dat dan wordt gefotografeerd. Een draden-

kamer bevat een groot aantal elkaar kruisende dunne metaaldraadjes waarop elektrische spanning staat. Een elektrisch geladen deeltje veroorzaakt een reeks van ontladingen (vonkjes) tussen de draden waar het langskomt. Deze worden dan rechtstreeks elektronisch geregistreerd. Het voordeel daarvan is dat het signaal linea recta de computer in gaat.

Een elektrisch *neutraal* deeltje laat nooit direct een spoor na, maar als het interacties vertoont (het valt uiteen in geladen deeltjes of het botst tegen deeltjes in het apparaat), dan registreert men dit natuurlijk wel. Men plaatst bovendien meestal het gehele apparaat tussen de poolschoenen van een krachtige magneet. Hierdoor gaan de geladen deeltjes een krom spoor volgen, en aan de kromming is dan af te lezen hoe snel het deeltje ging. Maar omdat deze kromming ook van de massa van het deeltje afhangt, is het soms nuttig de snelheid ook nog op een andere manier te meten.

Meestal bewegen de deeltjes zich met snelheden die niet ver onder de lichtsnelheid zitten. Gedurende hun korte leventje leggen ze daardoor toch nog enige centimeters af. Uit de gemiddelde lengte van zo'n spoor wordt dan de gemiddelde levensduur afgeleid. Het gebied tussen 10^{-13} en 10^{-20} seconden is echter heel moeilijk direct te meten. Men leidt de levensduur af langs indirecte weg door de krachten waarmee het deeltje in andere kan overgaan in andere deeltjesreacties te meten. Dan kun je de levensduur uitrekenen. U ziet dat de experimentatoren met eindeloos veel vernuft een heel arsenaal van technieken hebben opgebouwd om zoveel mogelijk over onze deeltjes te weten te komen. Bij sommige van dit soort metingen is het uiterst moeilijk grote nauwkeurigheid te bereiken. De getallen die u in tabel 1 ziet zijn de resultaten van vele, vele manjaren precisiemeetwerk. Ik heb de laatst gepubliceerde gegevens hier weergegeven.

Dat de meeste deeltjes een gemiddelde levensduur hebben van 10^{-8} seconden of iets dergelijks, betekent dat hun golfjes

meer dan 100.000.000.000.000 trillingen mogen uitvoeren tot ze een keer uiteenvallen. We kunnen daarom gerust zeggen dat de kracht die voor dit uiteenvallen verantwoordelijk is uiterst *zwak* is. Ze zijn te vergelijken met een stemvork die pas na 100.000.000.000.000 trillingen uitdooft omdat er een uiterst zwakke wrijvingskracht is. De kracht die deze deeltjes laat uiteenvallen zijn we gaan kennen als de ‘zwakke kracht’.

Het uiteenvallen van het neutron schrijven we ook toe aan de zwakke kracht, hoewel de levensduur van het neutron veel langer is (gemiddeld een kwartier). Sterker nog, sommige radioactieve atoomkernen die ook zwak uiteenvallen, kunnen daar vele miljoenen of zelfs miljarden jaren over doen. Maar de reden voor deze veel langere levensduur is dat de hoeveelheid massa die in bewegingsenergie kan worden omgezet in deze gevallen heel klein is.[1] Kennelijk is dus niet alleen de sterkte van een kracht, maar zeker ook de hoeveelheid vrijkomende energie bepalend voor de vervalsnelheid van een deeltje.

Als de zwakke kracht er niet geweest was, zouden dus de meeste deeltjes in de tabel helemaal stabiel zijn. De kracht verantwoordelijk voor het verval van π^o, η en Σ^o is de elektromagnetische kracht. U ziet dat deze deeltjes een veel kortere levensduur hebben; de elektromagnetische kracht is dan ook veel sterker dan de zwakke kracht.

Deze hele wirwar van subatomaire deeltjes was in de jaren vijftig en zestig ten tonele verschenen. ‘Als ik dit had kunnen voorzien, was ik plantkunde gaan studeren!’ verzuchtte Enrico Fermi, de beroemde Italiaanse natuurkundige.

Ten slotte waren er in 1970 ook nog hele series hadronen bekend met veel grotere spinwaarden. Deze echter kunnen al

1 Het uiteenvallende neutron kan slechts 0,7 MeV gebruiken om een proton, een elektron en een neutrino in beweging te zetten. Een radioactief uiteenvallende atoomkern heeft hiervoor vaak nog veel minder energie beschikbaar.

De sterke kracht

- De sterke kracht werkt alleen in op de deeltjesgroep die we *hadronen* noemen. Deze krijgen hierdoor een ingewikkelde inwendige structuur.

  Tot omstreeks 1972 kenden we slechts de strenge symmetrieregels van deze sterke kracht, maar konden we de krachtwetten niet nauwkeurig formuleren.

- De reikwijdte van de kracht is niet verder dan de straal van een lichte atoomkern (ca. 10^{-13} cm).
- De kracht is sterk. Deeltjes die door toedoen van de sterke kracht kunnen uiteenvallen, doen dat dan ook zeer snel. Deze noemen we ‘resonanties’. Een voorbeeld is de Δ-resonantie, met een gemiddelde levensduur van slechts 0,6 × 10^{-23} sec. Als twee hadronen dichter dan ca 10^{-13} cm bij elkaar komen is de kans dat ze botsen vrijwel zeker.
- De pionen (spin 0, massa 135 tot 140 MeV) werden tot omstreeks 1972 als dragers van de sterke kracht beschouwd. De sterke aantrekkingskracht tussen bijvoorbeeld twee protonen wordt voornamelijk veroorzaakt door de uitwisseling van pionen.

  Thans zeggen we dat dit alleen maar komt doordat de pionen toevallig de lichtste hadronen zijn. Net als alle andere hadronen zijn ze uit ‘quarks’ opgebouwd. We zien nu de sterke krachten tussen de hadronen als uitvloeisel van een nog sterkere kracht tussen de quarks. De dragers van die nog sterkere kracht zijn de gluonen, waarover meer in hoofdstuk 13.

door toedoen van de sterke kracht uiteenvallen. Daardoor hebben ze alle een uiterst korte levensduur (alle in de buurt van 10^{-23} seconde). Het is meestal gemakkelijk na te gaan welke hadronen door toedoen van sterke krachten uiteen kunnen vallen. Je hoeft slechts een aantal deeltjes te kunnen aanwijzen in de tabel die zodanig zijn dat al hun ladingen (dus ook *S* en I_3) opgeteld dezelfde zijn als die van het oorspronkelijke deeltje en bovendien de massa's opgeteld *kleiner* zijn dan die van het oorspronkelijke deeltje. Dan is er geen enkele belemmering meer voor het oorspronkelijke deeltje om in deze combinatie van deeltjes over te gaan. De overtollige massa wordt in bewegingsenergie omgezet.

Bij deeltjes met een zo korte levensduur heeft het uiteenvallen een effect op de energie waarmee het deeltje geproduceerd werd. Vergelijken we het deeltje weer met een stemvork, dan betekent het uiteenvallen ervan dat de stemvork wordt gedempt. Maar dan wordt de trillingsfrequentie (die direct met de energie correspondeert) minder precies, en de *resonantiecurve* van de stemvork wordt minder scherp. We noemen zo'n deeltje een *resonantie*, en de levensduur is direct uit de resonantiecurve af te leiden.

Een bekend voorbeeld van een resonantie is het *delta* (Δ), waarvan er vier soorten zijn: Δ^-, Δ^o, Δ^+ en Δ^{++}. De laatste heeft een dubbele elektrische lading. De massa's zijn bijna gelijk: alle ongeveer 1230 MeV. De vreemdheid *S* is nul en I_3 loopt van -1½ tot +1½; baryongetal *B* is 1. Dit alles betekent dat ze in een proton of een neutron en een pion vervallen kunnen, bijvoorbeeld:

$$\Delta^{++} \rightarrow \mathrm{p} + \pi^+;\ \Delta^{\mathrm{o}} \rightarrow \mathrm{p} + \pi^- \text{ of } n + \pi^{\mathrm{o}}$$

Telt u de (rust)massa's bij elkaar op, dan ziet u dat er meer dan 150 MeV overblijft. Dit wordt in bewegingsenergie omgezet.

Er zijn mesonische en baryonische resonanties. De deltareso-

nanties zijn baryonisch (we zullen later de mesonische resonantie ϱ (rho) tegenkomen). Rond 1970 kende men vele tientallen resonanties en had het er alle schijn van dat er eigenlijk oneindig veel zijn, ieder met wat meer massa dan de voorafgaande, maar met een zo korte levensduur dat hun uiterst kortstondige aanwezigheid niet meer valt vast te stellen.

U kunt resonanties beschouwen als deeltjes in een ‘aangeslagen toestand’. Het zijn replica's van de bestaande hadronen, maar meestal harder om hun as draaiend of op een andere manier aan het trillen gebracht, zoals men een gong aan het trillen brengt door ertegen te slaan. En zoals een gong geluid uitzendt en daardoor geleidelijk aan ophoudt met trillen, zo zendt een resonantie pionen uit, waarbij het dan overgaat in een stabiel(er) deeltje.

7 De wonderlijke kaonen

Ik ben niet van plan alle deeltjes uitvoerig te behandelen, maar de kaonen vormen hierop een uitzondering. Een aantal jaren geleden kon men in iedere speelgoedwinkel een flesje 'siliconenrubber' krijgen. Het was wonderlijk spul. Je kon het kneden als klei, en er bijvoorbeeld een balletje van maken. Gooide je dat ergens tegenaan dan bleek het uiterst elastisch terug te kaatsen, heel anders dan je van klei zou verwachten. Liet je dat balletje ergens enige tijd liggen dan zag je tot je verbazing dat het in elkaar zakte en ten slotte meer op een plasje water dan op klei leek, laat staan een kaatsbal. Toch bleef het aanvoelen en kneedbaar als klei. De natuurkundige verklaring van deze ogenschijnlijk tegenstrijdige eigenschappen moet te vinden zijn in de structuur van de moleculen van deze stof. Ik denk dat ze als korte draadjes elkaar steeds korte tijd vasthouden door om elkaar heen te krinkelen maar voortdurend elkaar weer los laten om zich aan andere te hechten.

De neutrale kaonen zijn zo mogelijk nog gekker dan siliconenrubber. Ze komen in twee soorten voor, K_{lang} en K_{kort}. Maar je kunt ook zeggen dat er twee soorten zijn die we K^{o} ('*ka-nul*') en $\bar{K}^{\text{o}}$ ('*anti-ka-nul*') noemen. Heb je een K^{o}, dan heb je 50 procent kans dat het een K_{lang} is en 50 procent kans dat het een K_{kort} is. Hetzelfde geldt als je met een $\bar{K}^{\text{o}}$ begon. Anderzijds, als je 'weet' dat je een K_{lang} in je vingers hebt, dan is de kans weer 50 procent dat dit zich als een K^{o} gedragen zal, en 50 procent dat het een $\bar{K}^{\text{o}}$ zal blijken te zijn. Ook een K_{kort} kan zich in 50 procent van de gevallen als K^{o} en in 50 procent van de gevallen als $\bar{K}^{\text{o}}$ voordoen. Anderzijds, een K_{lang} gedraagt zich *nooit* als een K_{kort}, en een K^{o} gedraagt zich *nooit* als een $\bar{K}^{\text{o}}$!

Als de lezer niet zeer goed vertrouwd is met de wonderen van de quantummechanica zal hij of zij van dit alles geen jota begrijpen. Daarom noem ik deze kaonen het siliconenrubber van

de elementaire deeltjes. Laat ik trachten de mysterieuze mededelingen die ik zojuist deed verder toe te lichten.

De *gemiddelde* levensduur van een K_{kort} is minder dan 10^{-10} seconde, zoals in tabel 1 is weergegeven. Sommige zullen een beetje langer leven en andere een beetje korter, maar na pakweg 5×10^{-10} seconde zullen verreweg de meeste K_{kort}-deeltjes vervallen zijn. De K_{lang}-deeltjes leven gemiddeld zo lang dat de kans dat één van hen reeds na 5×10^{-10} seconde uiteenvalt erg klein is. Als je nu een neutraal kaon hebt dat binnen 5×10^{-10} seconden uiteengevallen is, weet je daarom praktisch zeker dat het een K_{kort} was. Leeft het daarentegen dan nog steeds, dan is het praktisch zeker een K_{lang}, en mag je verwachten dat het pas na omstreeks 5×10^{-8} seconde uiteen zal vallen.

Voor K_{lang} en K_{kort} nu zijn de quantumgetallen S en I_3 niet geldig. Maar als je een kaon produceert via de reactie

$$p + p \rightarrow \Sigma^+ + p + K^o$$

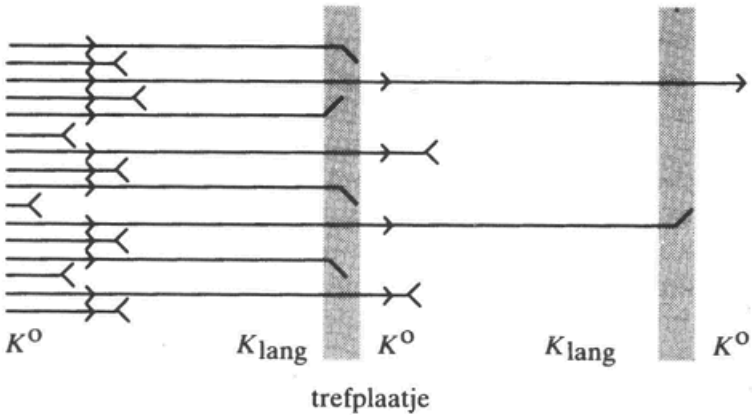
dan weet je zeker dat het vreemdheidgetal S gelijk +1 moet zijn, want Σ^+ heeft S = -1, en de rest heeft S = 0. Nu heeft K^o vreemdheid S = 1, en $\bar{K}^o$ heeft S = -1. Dus deze reactie heeft *zeker* een K^o en niet een $\bar{K}^o$ opgeleverd.

Laten we een bundel neutrale kaonen door een trefplaatje lopen, dan kunnen deze allerlei interacties ondergaan. Maar de $\bar{K}^o$ worden sneller uit de weg geruimd dan de K^o, omdat die met een proton uit het trefplaatje reacties zoals

$$\bar{K}^o + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^o$$

kunnen aangaan, wat bij de andere niet mogelijk is.

Figuur 7 laat nu zien wat er kan gebeuren als we een bundel kaonen eerst gedurende 10^{-8} seconde ongemoeid laten en dan door een trefplaatje laten gaan. Na nog eens 10^{-8} seconde gaan ze weer door een trefplaatje.



Figuur 7. Geïdealiseerde voorstelling van een experiment met neutrale kaonen. Na hun productie (links) valt (ongeveer) de helft vrij snel uiteen in twee pionen. De andere zijn veel stabieler. We weten nu dat dit K_{lang} is. Van deze wordt nu ongeveer de helft door een trefplaatje geabsorbeerd. De andere lijken immuun; dit zijn vrijwel zeker de deeltjes K^o. Op hun beurt vervallen deze voor de helft zeer snel, de overgeblevene leven weer lang. Dit kan men net zolang herhalen tot de kaonen op zijn.

De deeltjes die geproduceerd zijn, en de deeltjes die door het trefplaatje heen gekomen zijn, zijn (voornamelijk) K^o. De deeltjes die na 10^{-8} seconde nog steeds niet vervallen zijn, zijn zeker K_{lang} en niet K_{kort}. De schets is een idealisatie. In een werkelijk experiment vliegen de *K*-deeltjes alle kanten uit.

U kunt zich voorstellen dat dit merkwaardige gedrag bij de ontdekking van deze deeltjes aanleiding gaf tot verwarring. Men dacht aanvankelijk dat er veel meer soorten waren. We hebben hier te maken met een typisch quantummechanisch verschijnsel. De sterke kracht respecteert behoud van vreemdheid, zodat men bij de productie altijd zeker weet of er een K^o of een $\bar{K}^o$ is ontstaan. Maar na 10^{-10} seconde (en dat is veel *langer* dan de duur van het productieproces zelf, ongeveer 10^{-24}

seconde!) doet de zwakke kracht zich voelen. Deze nu trekt zich niets van S of I_3 aan. Er vinden *overgangen* plaats van het type

$$K^o \leftrightarrow \bar{K}^o$$

en dit heen en weer huppelende systeem kan dit op twee manieren doen. Dat zijn de 'quantumtoestanden' K_{lang} en K_{kort}.

Wat er namelijk gebeurt, is dat zowel K^o als $\bar{K}^o$ in twee pionen uiteen kunnen vallen, maar er vindt 'interferentie' plaats. Als de twee bronnen, K^o en $\bar{K}^o$, met elkaar in de pas lopen, is er positieve interferentie. De piongolven versterken elkaar en het deeltje valt snel uiteen. Het was een K_{kort}. Maar als de interferentie uitdovend is, kan het systeem niet in twee pionen vervallen. Het is dan een K_{lang}. De kansen zijn steeds 50/50. K_{lang} kan wél in *drie* pionen uiteenvallen, maar dat duurt veel langer. Vandaar.

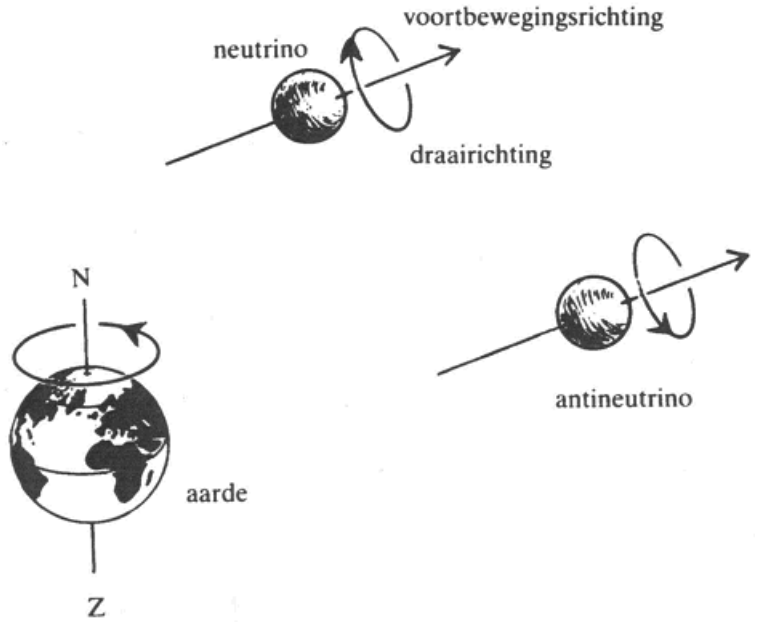
Omdat quantummechanica een moeilijk vak is, verwacht ik eigenlijk niet dat deze uitleg geheel toereikend is. Dat is niet zo heel erg. U kunt ook met siliconenrubber spelen zonder te begrijpen hoe het werkt. Het is niet de bedoeling de lezer het gevoel te geven dat hij 'dom' is om zelf heel geleerd over te komen. Quantummechanica is een specialisme waarvoor niet alleen veel studie maar ook een zeker gewenningsproces nodig is, waarvoor ik u al waarschuwde in mijn voorwoord.

Er is nog veel meer te beleven aan de neutrale kaonen. Om dat uit te leggen moet ik eerst iets meer vertellen over die zwakke kracht. Zij overtreedt namelijk een aantal natuurwetten, zoals we hebben gezien: vreemdheid en isospin zijn niet behouden. Niettemin zijn er andere behoudswetten die wel worden gerespecteerd.

We zullen dikwijls spreken van *behoud van symmetrie*. Een uiterst belangrijke symmetrie voor elementaire deeltjes is spiegelsymmetrie. Daarvoor vergelijken we deeltjes met hun spie-

gelbeeld. Vóór 1956 was men er altijd van uitgegaan dat ieder natuurverschijnsel de natuurwetten even goed respecteert als het spiegelbeeld van dat verschijnsel. Een gevolg daarvan zou zijn dat als een stel deeltjes op een spiegelsymmetrische manier tegen elkaar botsen, de spiegelsymmetrie aanwezig zou moeten blijven.

De ontdekking dat vele deeltjes heel anders zijn dan hun spiegelbeeld werd gedaan door twee Chinese natuurkundigen,



Figuur 8.

Tsung Dao Lee en Chen Ning Yang, niet lang nadat ze naar de Verenigde Staten waren geëmigreerd. Het bleek dat de zwakke kracht onderscheid maakt tussen links en rechts. Dat onderscheid is het meest markant bij het neutrino. Neutrino's hebben slechts een uiterst geringe rustmassa, zodat ze zich meestal ge-

dragen als een foton, dat wil zeggen ze bewegen zich praktisch even snel voort als het licht. Nu draaien neutrino's daarbij ook nog om hun as (ze hebben spin ½). Als we nu eens ‘noordpool’ en ‘zuidpool’ definiëren net als bij de draaiende aarde, dan heeft het neutrino de bijzonderheid dat het altijd bij zijn ontstaan zijn zuidpool in de richting heeft waarin het beweegt, en de noordpool achter zich. Neutrino's waarbij dat andersom is zijn nog nooit waargenomen.

De Zweedse natuurkundige Cecilia Jarlskog vergeleek neutrino's daarom met vampiers: ze hebben geen spiegelbeeld! Hun spiegelbeeld is een natuurkundige onmogelijkheid. Nu is mijn kennis van de vampirologie beperkt. Misschien is het zo dat als u een vampier bent, u misschien met heel veel moeite toch nog een vaag spiegelbeeld in uw spiegel kunt ontwaren. Pas in de jaren negentig kon men vaststellen dat neutrino's een geringe hoeveelheid rustmassa hebben, hetgeen impliceert dat ze wat langzamer gaan dan het licht, en daardoor in principe in staat moeten zijn andersom te draaien. In hoofdstuk 18 kom ik terug op het verkeerd om draaiende neutrino. Wel heeft het *antineutrino* altijd zijn noordpool vóór zich. Dit is het deeltje dat we aangeven met $\bar{\nu}_e$ of $\bar{\nu}_\mu$. Het blijkt dat alle deeltjes heel veel lijken op het spiegelbeeld van hun antideeltjes.

Het verval van het K_{kort} in twee pionen is wel volledig spiegelsymmetrisch. Dit leek niet te rijmen met het productieproces van de kaonen, tenzij er gedurende het verval een kracht aanwezig was die de symmetrie verstoorde. Het argument hiervoor is weer een moeilijk quantummechanisch verhaal. Als ik het spiegelbeeld bereken van het verval van K^o (óf $\bar{K}^o$) in twee pionen ontdek ik dat dit door interferentie het verval van het oorspronkelijke deeltje geheel zou uitdoven, *tenzij* het spiegelbeeld anders is. Kortom, uit het feit dat neutrale kaonen überhaupt in twee pionen kunnen uiteenvallen, concludeert men dat spiegelsymmetrie bij de zwakke kracht niet geldt. Dat betekent dat er een *schroefzin* zit in de zwakke kracht.

Wel weten we dat de emissie van pionen door enerzijds K^o en anderzijds $\bar{K}^o$ geheel kan weg-interfereren. Hier nu kan men uit concluderen dat een deeltje wél hetzelfde doet als het spiegelbeeld van zijn *anti*deeltje. Dit noemen we nu de *PC*-symmetrie van de zwakke kracht. Spiegeling ('pariteit') geven we aan met een *P*, vervanging van een deeltje door het antideeltje ('conjugatie') met de letter *C*. Alleen de combinatie *PC* is een symmetrie van de zwakke kracht, niet *P* en *C* afzonderlijk.

Maar nu is er nog iets aan de hand. We hebben vastgesteld dat de *PC*-symmetrie er de oorzaak van is dat door uitdovende interferentie het K_{lang} nooit in twee pionen kan uiteenvallen. James Christenson, James Cronin, Val Fitch en René Turlay besloten deze mededeling te toetsen met een experiment. Om nauwkeurig te kunnen meten, waren de sporadische *K*-deeltjes die hoog in de atmosfeer in ballonexperimenten werden gemeten niet geschikt. Met kaonen die in versnellers worden geproduceerd, kun je veel beter werken. (Val Fitch zei later dat hij dat wel jammer vond; hij zat liever in de bergen dan onder de grond.)

Na zeer uitvoerig meten, en vooral checken, ontdekten deze experimentatoren in 1964 dat gemiddeld 3 van de 1000 K_{lang}-deeltjes tóch in twee pionen uiteenvalt! Het knappe van het experiment was dat zij er zich van konden verzekeren dat het geen K_{kort} kon zijn geweest, en vooral dat er geen derde deeltje was geweest dat wellicht aan de aandacht kon zijn ontsnapt. Pas na een half jaar controleren en analyseren hadden ze zich hiervan overtuigd. Het interferentieverschijnsel dat ik noemde is niet honderd procent waterdicht, er lekt wat!

Wat we hieruit moeten opmaken, is dat ook de wet van behoud van *PC*-symmetrie door de zwakke kracht heel lichtjes overtreden wordt. Maar je kunt ook zeggen dat er nóg een kracht is, een superzwakke kracht, die er louter op gericht is *PC*-symmetrie te saboteren. We zullen later zien dat we weliswaar deze kracht in onze natuurbeschrijving kunnen opnemen,

maar dat de diepere reden voor het bestaan van deze kracht voorlopig nog een raadsel zal blijven. In 1980 kregen Cronin en Fitch, de leiders van het experiment, voor hun ontdekking de Nobelprijs.

Er is overigens nog een symmetrie die met dit alles verband houdt: *tijdsomkering, T*. Je kunt het verloop van een natuurverschijnsel terugwaarts volgen in de tijd, bijvoorbeeld door een film ervan achteruit af te draaien. Als we nu tegelijk spiegelen (*P*), lading omkeren (*C*) en de tijd omkeren (*T*) blijven de natuurwetten exact dezelfde. Dit kan men met ingewikkelde redeneringen uit de theorie afleiden. Je kunt het ook experimenteel toetsen, bijvoorbeeld door na te gaan of de rustmassa van een deeltje wel precies dezelfde is als die van zijn antideeltje. Afwijkingen zijn nog nooit geconstateerd. Dat vonden de experimentatoren jammer. Ze hadden maar wat graag de theorie in zijn hemd gezet.

De ontdekking dat *PC*-symmetrie niet exact door de natuurwetten wordt gerespecteerd, wordt vaak in verband gebracht met een probleem in de kosmologie of 'heelalkunde'. De enorme aantallen hemellichamen in ons heelal bestaan alle uit protonen, neutronen en elektronen. Men weet praktisch zeker dat er geen enkele ster of sterrenstelsel is die uit 'antimaterie' bestaat: antiprotonen, antineutronen en positronen.[1] Dat is gek. Waarom dit gebrek aan symmetrie? Welnu, in het allereerste beginstadium van het heelal was er misschien helemaal geen verschil tussen de hoeveelheden materie en antimaterie. Er was slechts een zeer hete 'soep' van uiterst energetische oerdeeltjes. Daarna kunnen er natuurkrachten werkzaam zijn geweest die

1 Dit weet men omdat er zich tussen de sterren en de sterrenstelsels ijle gaswolken bevinden. Als er 'antisterren' of 'antisterrenstelsels' zouden bestaan dan zouden er op allerlei plaatsen in die gaswolken ontmoetingen tussen materie en antimaterie optreden. De heftige annihilatiestraling die daarbij zou moeten ontstaan is nooit waargenomen.

hieruit de ons bekende deeltjes deden condenseren, maar met een lichte voorkeur voor materie in plaats van antimaterie. Die krachten zouden de wet van behoud van baryongetal moeten overtreden, maar dat is geen probleem; we zullen later zulke krachten tegenkomen. Men weet echter dat zulke effecten ook niet zouden kunnen optreden zonder ook *PC*-symmetrie te verbreken, als we mogen aannemen dat het heelal min of meer spiegelsymmetrisch is.

Nu we weten dat *PC*-symmetrie niet geldt, kan men heelalmodellen bedenken waarin het heelal begon als zijnde klein en leeg, en vanzelf evolueerde tot wat het nu is. Dit is een veld van onderzoek dat bezig is zich te verheffen van sciencefiction tot een belangwekkende tak van wetenschap. Meer hierover in hoofdstuk 30.

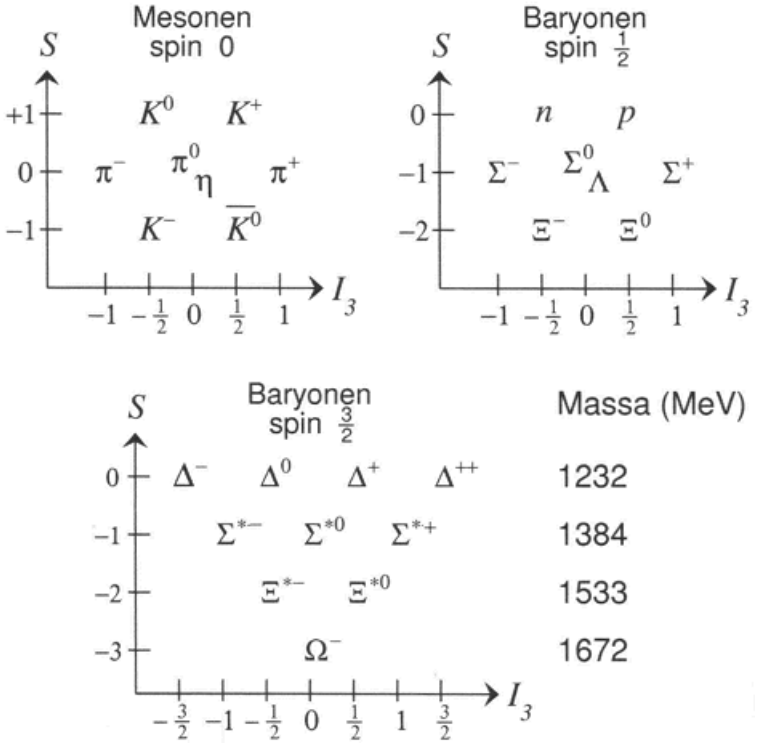
8 De onzichtbare quarks

Toen de indeling van de diverse deeltjessoorten duidelijk was geworden, bleek er een zeker patroon in herkenbaar. Net zoals Dmitri Ivanovich Mendeleev in 1869 het ‘periodieke systeem van de chemische elementen’ ontdekte, werd er ook een zeker systeem van elementaire deeltjes zichtbaar. Dit patroon werd gelijktijdig ontdekt door de Amerikaan Murray Gell-Mann en de Israëli Yuval Ne'eman. Acht mesonsoorten met ieder dezelfde spinbeweging, of acht baryonsoorten met ieder dezelfde spin, zouden prachtig bijeenpassen in groepjes die men *multipletten* noemt. Het overeenkomstige wiskundige schema noemt men *SU*(3). Groepjes van acht stuks vormen een ‘fundamenteel’ multiplet. Daarom noemde Gell-Mann zijn theorie ‘The Eightfold Way’, een benaming die hij aan het boeddhisme ontleende. De weg naar Nirvana is de Achtvoudige Weg.

Maar de *SU*(3)-wiskunde laat ook multipletten toe met *tien* elementen erin. Toen het schema voorgesteld werd kende men *negen* baryonen met spin 3/2. Ze komen geen van alle in tabel 1 voor omdat het resonanties zijn. Vier ervan zijn de eerder genoemde Δ-resonanties. Ze vallen uiteen in stabiele baryonen en pionen. De *SU*(3)-patronen vindt men als voor deeltjes met een bepaalde spin twee fundamentele eigenschappen in grafiekjes tegen elkaar worden uitgezet: vreemdheid *S* tegen isospin I_3. Ik heb er een paar geschetst in tabel 2.

Gell-Mann voorspelde dus een tiende baryon, het *omega-min* (Ω^-). Hij kon ook redelijk goed de *massa* van het omega-min voorspellen, want de massa's in dit schema bleken op eenvoudige wijze met de plaats in de grafiek samen te hangen. Echter, nu bleek dat dit omega-min niets had om in uiteen te vallen dat niet verboden was voor de sterke kracht, omdat zijn vreemdheid *S* maar liefst -3 bedroeg. Dit betekende dat omega-min alleen zwak vervallen kan, en dus niet 10^{-23}, maar 10^{-10} seconde

leeft. Bijgevolg kan dat deeltje enige centimeters afleggen voordat het vervalt, en dat maakt het experimenteel waarneembaar. In 1964 werd omega-min aangetoond, met precies de eigenschappen voorspeld door Gell-Mann.



Tabel 2. Twee octetten en een decuplet.
(Bij octetten wordt de middelste plaats door twee deeltjes bezet.)

Gell-Mann zag ook in hoe je het bestaan van deze structuren het gemakkelijkst zou kunnen verklaren. Hij suggereerde dat

de mesonen en de baryonen samengesteld zijn uit ‘nog elementairdere’ bouwsteentjes. Gell-Mann werkte in het California Institute of Technology in Pasadena, in Californië, waar hij veel discussieerde met Richard Feynman. Beiden waren befaamd natuurkundigen, maar hun persoonlijkheden waren zeer verschillend. Gell-Mann is een fanatiek vogelwaarnemer en hij spreidt een grote kennis op het gebied van vreemde talen en literatuur ten toon. Feynman stond bekend als de ‘no-nonsense’-analysator, die graag de draak stak met alles wat op gevestigd gezag lijkt.

Het verhaal gaat dat Gell-Mann aan Feynman vertelde dat hij een probleem had: hoe moest hij de door hem bedachte bouwsteentjes noemen? Ongetwijfeld dacht hij aan de Latijnse of Griekse terminologie die in wetenschappelijke kringen gebruikelijk was. ‘Ach wat,’ zou Feynman gezegd hebben, ‘je praat hier over dingen die nog nooit eerder benoemd zijn. Die mooie woorden zijn hier niet op hun plaats. Zeg toch gewoon dat het “schrumpfs” zijn, of “quarks”, of zoiets.’[1]

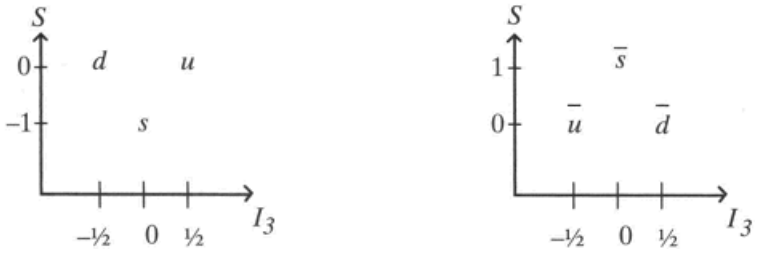
En quarks zouden het zijn. Want Gell-Mann dacht aan een frase uit *Finnegans Wake* van James Joyce: ‘Three quarks for Muster Mark.’ En ja, dat klopt. Deze deeltjes komen nog steeds graag met z'n drieën bij elkaar. Alle *baryonen* zijn opgebouwd uit drie quarks terwijl de *mesonen* bestaan uit één quark en een antiquark.

De quarks vormen een nog eenvoudiger patroon, geschetst in tabel 3. We noemen ze ‘up’ (*u*), ‘down’ (*d*), en ‘strange’ (*s*). ‘Gewone’ deeltjes bevatten alleen up- en/of down-quarks. ‘Vreemde’ deeltjes bevatten één of meerdere *s*-quarks, al naar gelang de waarde van hun vreemdheidsgetal *S*. Het omega-min bevat maar liefst drie *s*-quarks. Tabel 4 toont hoe het mesonoctet uit

1 Dit eerste gedeelte van het verhaal legde ik aan Gell-Mann voor, maar hij ontkent met kracht. Ik wilde u deze uit iemands duim gezogen versie echter niet onthouden.

quarks en antiquarks kan worden opgebouwd.[1] De quark-opbouw van het decuplet van baryonen met spin 1½ ziet u in tabel 5. Waarom de baryonen met spin ½ slechts een octet vormen is wat moeilijker uit te leggen. Het komt erop neer dat daarin minstens twee quarks verschillend moeten zijn.[2]

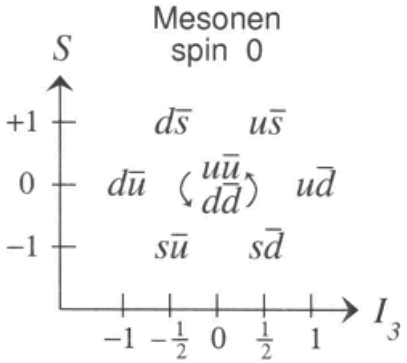
Overigens waren onafhankelijk van Gell-Mann ook anderen op het idee van nieuwe fundamentele bouwstenen gekomen. George Zweig, eveneens verbonden aan CalTech in Pasadena, had hetzelfde idee. Hij noemde zijn bouwstenen ‘aces’. Maar het woord ‘quarks’ is gebleven. Hoe het komt dat sommige namen beter aanslaan dan andere weet ik niet.



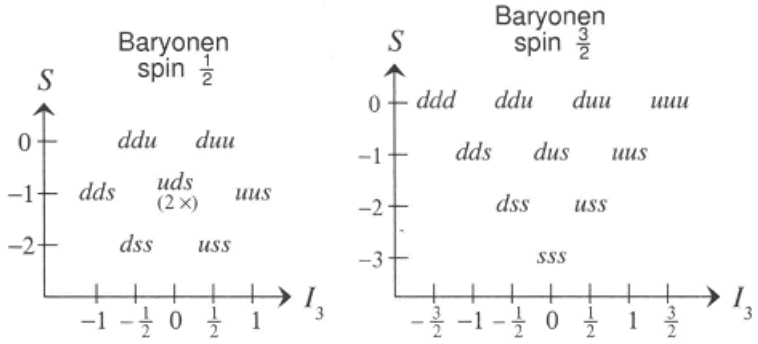
Tabel 3. De quark- en antiquarktripletten.

1 Met drie quarks en drie antiquarks zijn uiteraard *negen* combinaties mogelijk, maar de negende, een deeltje dat voortdurend van samenstelling wisselt, uū ↔ dd̄ ↔ ss̄, zondert zich af. Dit object, het η, is aanzienlijk zwaarder dan de overige.

2 Maar je kunt het ook preciezer zeggen. Gegeven zijn drie types quark (*u, d* en *s*), ieder met spin op of spin neer; in totaal dus zes soorten ‘quarktoestanden’. Het aantal verschillende soorten groepjes van drie die je daarvan kunt maken is 56. Ieder element uit het decuplet heeft spin 3/2 en kan (wonder uit de quantummechanica) daarom in 4 spintoestanden zitten. De leden van het octet hebben spin ½ en kunnen daarom ieder slechts in twee spintoestanden zitten. En dan kloppen de getallen: 56 = 4 × 10 + 2 × 8.



Tabel 4. De quark-antiquarksamenstelling van mesonen (de deeltjes in het midden gedragen zich ook tijdelijk als ss̄).



Tabel 5. De quarksamenstelling van de baryonen.

Er is echter iets eigenaardigs met deze theorie. Kennelijk blijven de quarks (of aces) altijd met twee of drie bij elkaar klitten en komen ze nooit een keer alleen voor. Er werden dan ook allerlei pogingen ondernomen door experimentatoren om deze bouwstenen direct in hun apparatuur waar te nemen, zonder enig succes.

Quarks, áls ze afzonderlijk voor zouden komen, zouden wel eens nog meer rare eigenschappen kunnen hebben. Want wat is hun elektrische lading? Stel dat deze voor alle *u*-quarks dezelfde is, en ook één waarde heeft voor alle *d*-quarks en ook één voor alle *s*-quarks. Vergelijk dan eens tabel 5 met tabel 2. De *d*- en de *s*-quarks moeten dan ieder lading -⅓ hebben, en de *u*-quark lading +⅔. Maar deeltjes waarvan de elektrische lading niet een geheel veelvoud is van die van het elektron en het proton zijn nog nooit waargenomen. Als zulke rare deeltjes bestaan, zouden ze heel goed experimenteel kunnen worden waargenomen. Dat dat steeds onmogelijk is gebleken, betekent kennelijk dat ze elkaar binnen een hadron ongelofelijk stevig vasthouden.

Met de komst van de quarks was er weer een beetje meer regelmaat gekomen in de flora en fauna van de subatomaire deeltjes. Maar nog steeds vormden deze een bont gezelschap, al zijn er slechts een paar soorten die in groten getale in gewone materie voorkomen (proton, neutron, elektron, foton). En, zoals Sybren R. de Groot eens zei toen hij neutrino's bestudeerde, je gaat van ze houden. Als student hielden we van al deze deeltjes. Hun gedragingen vormden een groot mysterie. De leptonen leken het eenvoudigst, omdat ze puntvormig zijn. Maar ze hebben wel spin, en dat maakte dat vooral de zwakke interactiekracht toch nog op een heel ingewikkelde manier op ze inwerkt. De zwakke kracht was echter al vrij aardig in kaart gebracht.

De hadronen waren helemaal mysterieus. Hun botsingen waren te ingewikkeld voor iedere fatsoenlijke theorie. Als je pro-

beerde ze voor te stellen als bolletjes van een of ander materiaal dan zat je toch maar voor het probleem hoe dan die quarks te begrijpen zijn, en waarom deze er steeds in slagen al onze pogingen ze van elkaar te isoleren te weerstaan.

9 Velden of schoenveters?

Voor de zwakke kracht bestond er sinds 1958 een *fenomenologische* theorie. Dat wil zeggen dat we formules hadden die met een onnauwkeurigheidsmarge van een paar procenten de uitwerkingen van de zwakke kracht bij de tot dan toe onderzochte deeltjes correct beschreef. Die theorie zou nooit een *fundamentele* theorie kunnen zijn, want men besefte dat bij zeer heftige botsingsprocessen deze theorie spaak zou lopen. Helaas zou het nog tientallen jaren duren voordat zulke energierijke botsingen tussen deeltjes in het laboratorium gerealiseerd konden worden. Daarom leek het erop dat we voorlopig tevreden moesten zijn met onze 'tijdelijke' theorie.

Van de *sterke* kracht hadden we een soort lappendeken van fenomenologische theorieën, geen van alle erg nauwkeurig, en het geheel was daarom erg onbevredigend. Het enige wat goed begrepen werd van de sterke krachtwerking waren de diverse behoudswetten zoals behoud van vreemdheid, isospin en nog een paar andere.

Een opvallend contrast hiermee was de situatie met de *elektromagnetische* krachten. Deze hebben de bijzonderheid dat ze grote afstanden kunnen overbruggen, en daarom is elektriciteit ook in de wereld van het grote bekend. Magnetische velden kunnen zich over astronomische afstanden uitstrekken tussen sterrenstelsels. Reeds in 1873 werd door de Engelse natuurkundige James Clerk Maxwell de juiste wiskundige formulering van de *elektrodynamica* gegeven.

Het ideale deeltje om de uitwerking van de elektromagnetische kracht erop te bestuderen is het elektron. Het is een lepton, zodat de sterke kracht er geen vat op heeft. Zijn massa is veel kleiner dan die van de meeste andere deeltjes; pas later zou men beseffen dat juist daarom allerlei indirecte invloeden van die andere deeltjes op het elektron onbelangrijk zijn. Nu werkt

weliswaar ook de zwakke kracht op het elektron in, maar die is daar zo verschrikkelijk zwak dat we haar gerust kunnen verwaarlozen. De elektronen die om een atoomkern heen cirkelen zijn als een miniatuurplanetensysteempje en het is uitsluitend de elektromagnetische kracht die hier de dienst uitmaakt.

Geen wonder dus dat de fundamentele theorie van de wisselwerking tussen elektronen en fotonen het eerst rond was. Deze wordt de ‘quantumelektrodynamica’ genoemd. De nauwkeurigheid waarmee men er allerlei eigenschappen van het elektron kan uitrekenen, is enorm. Eén van de indrukwekkendste voorbeelden daarvan is de berekening van het *magnetische dipoolmoment* van het elektron. Doordat het elektron om zijn as draait en ook elektrisch geladen is, werkt het als een miniatuurmagneetje. Paul A.M. Dirac, die als eerste de bewegingsvergelijking voor het elektron opstelde in overeenstemming met zowel de quantummechanica als de relativiteitstheorie, vond dat de sterkte van het magneetje uitgedrukt kon worden in reeds bekende fundamentele natuurconstanten, namelijk de constante van Planck, de lichtsnelheid, de massa en de lading van het elektron. Maar zijn vergelijking verwaarloosde bepaalde indirecte effecten van de fotonen op het elektron; deze konden later door Julian Schwinger en anderen met steeds grotere precisie worden uitgerekend. De experimenteel gemeten waarde van het magnetische moment van het elektron is nu

1,001 159 652 188 ± 0,000 000 000 004

maal de oorspronkelijk door Dirac gegeven combinatie van natuurconstanten. De quantumelektrodynamica geeft nu voor dit getal

1,001 159 652 17 ± 0,000 000 000 03

U ziet dat hier theorie en experiment wedijveren in de te bereiken nauwkeurigheid. De overeenkomst is bijna perfect. Ik geef

hier de getallen aan zoals die er omstreeks 2001 uitzagen. Ter vergelijking: als men met deze nauwkeurigheid de afstand van de maan zou meten zou de marge slechts enkele millimeters bedragen. De theorie lijkt een beetje achter te lopen: een onnauwkeurigheid van een centimeter, maar dit komt voornamelijk doordat de berekening afhangt van de waarde van de fundamentele lading van het elektron, waar nog een onzekerheid in zit.

Maar vóór dit glansrijke resultaat kon worden bereikt, moesten er nog enige bergen worden verzet. Een essentieel kenmerk van de theorie is het feit dat bij botsingsprocessen deeltjes ‘gecreëerd’ en ‘geannihileerd’ kunnen worden. Een gevolg hiervan is dat het totale aantal deeltjes dat betrokken is bij iedere botsing voortdurend kan veranderen.

Essentieel ook was het besef dat er twee totaal verschillende manieren zijn om tegen deze theorie aan te kijken: enerzijds beschrijven we alle processen als uitwisselingen van deeltjes, die overal gecreëerd en geannihileerd kunnen worden; maar anderzijds mogen we ook alles zien als verschillende soorten door elkaar heen golvende en kabbelende ‘velden’. Ieder type deeltje correspondeert met een soort veld. Het foton behoort bij het elektromagnetische veld. Het elektron heeft een heel merkwaardig soort ‘elektronveld’ (het ‘Diracveld’). In hun golfbewegingen reageren deze velden op elkaars aanwezigheid, en dit alles wordt nauwkeurig geregeld door hun ‘veldvergelijkingen’. De quantumelektrodynamica werd hierdoor het prototype van een ‘veldentheorie’.

Al vanaf ongeveer 1930 kende men de problemen die moesten worden opgelost. Dirac onderkende de noodzaak van het bestaan van een antideeltje voor het elektron, het *positron*[1], dat

1 Puristen stellen dat het correcte woord *positon* zou moeten zijn, want het deeltje is positief, niet ‘positrief’ geladen, in tegenstelling tot het elektron. Echter, niet alleen ligt *positron* beter in de mond, de correcte afleiding is van *positief elektron*.

in 1932 inderdaad door Carl D. Anderson experimenteel werd ontdekt. Door Paul Dirac, Julian Schwinger, Sin-Itiro Tomonaga, Richard Feynman, Freeman Dyson en vele anderen werd toen de theorie stukje bij beetje vervolmaakt.

De eerste moeilijkheid was dat de theorie niet op een wiskundig volledige manier geformuleerd kon worden, maar alleen als een reeks van opeenvolgende benaderingen, de volgende steeds nauwkeuriger dan de vorige, maar geen van alle 'exact' goed. De grootste moeilijkheid, die alles op losse schroeven leek te zetten, was het feit dat de eerste berekeningen van deze 'kleine correcties', zoals die in het magnetisch moment, steevast *oneindig* als antwoord gaven.

In 1970 wisten we heel precies hoe we met deze problemen om moesten gaan. Quantumelektrodynamica heet een *renormeerbare* theorie te zijn. Ruwweg betekent dit het volgende (maar ik kom er nog verschillende keren op terug). Je moest beginnen met het zogenaamde 'naakte elektron', ofwel een elektron zonder enig foton in de buurt. Dat je in werkelijkheid het elektron nooit helemaal van zijn omringende fotonen kunt ontdoen, zullen we eerst even vergeten. Dit naakte elektron heeft een 'naakte' elektrische lading en een 'naakte' massa. Als we van dit elektron direct het magnetische moment proberen uit te rekenen vinden we, helaas, 'oneindig', onzin dus. Maar als we nu uitrekenen wat er gebeurt als er fotonen in de buurt van dit elektron komen, ontdekken we dat deze fotonen heel dicht bij het elektron nieuwe elektronen en positronen creëren. Deze zien we niet direct, maar ze hebben wel allerlei effecten op het elektron. Ten eerste werken ze als een neutraliserend scherm tegen de elektrische lading. We noemen dit *vacuümpolarisatie*. Door vacuümpolarisatie verandert de effectieve elektrische lading van het elektron, en als we die verandering uitrekenen vinden we... óók een oneindig getal. En ten tweede hebben deze fotonen, elektronen en positronen een effect op de massa van het elektron (ze hebben energie, en dus ook massa). Ook deze

massaverandering is oneindig groot. Kortom, het werkelijke, ‘fysische’ elektron heeft een totaal andere elektrische lading en massa dan het naakte elektron.

Als we nu de theorie heel precies willen formuleren, moeten we ons realiseren dat een experimentator nooit een naakt elektron bestudeert. Hij neemt alleen het fysische elektron waar, en meet de totale lading en massa van dit fysische elektron. In de natuurconstanten die we gebruiken om het magnetisch moment van het elektron in uit te drukken, komen alleen de door de experimentator gemeten getallen voor en niet de getallen die behoren bij het naakte elektron. We moeten dus het magnetisch moment van het elektron vergelijken met de lading en massa van het fysische (dat wil zeggen het werkelijk waargenomen) elektron. Volg je de hieruit voortvloeiende voorschriften geduldig op dan blijken op verrassende wijze al die vervelende oneindigheden tegen elkaar weg te vallen. Er blijft een zinvolle uitdrukking over voor de sterkte van het magnetisch moment van het elektron, en dat is het eerder genoemde getal. Ergo: de oneindigheden zitten niet in het elektron of de krachten die erop inwerken, maar uitsluitend in ons hypothetische naakte elektron. De naakte lading en massa zijn oneindig (of liever: slecht gedefinieerd), maar die neem je dan ook nooit waar.

Lang niet iedereen was tevreden met deze redenering, maar de theorie functioneerde zo goed dat het gemopper overstemd werd door gejuich. Als we voor de andere natuurkrachten ook maar bij benadering zulke mooie theorieën zouden vinden, zouden we dik tevreden zijn. Dit boek gaat over hoe dit, tot ieders verrassing, inderdaad gebeurde.

In 1970 zag het daar niet naar uit. Het gejuich over de quantumelektrodynamica was wat verstomd. Het uitrekenen van de volgende decimaal in het magnetische moment van het elektron werd hels ingewikkeld en weinig interessant. De zwakke kracht, zoals men die toen kende, zou zeker niet renormeerbaar zijn. Je kon vrij eenvoudig aan de formules zien dat je maar niet

moest proberen de vacuümpolarisatie uit te rekenen die afkomstig is van de zwakke kracht, want er zouden oneindigheden uitkomen die onmogelijk tegen elkaar konden wegvallen. Je moest alle deeltjes die door de zwakke kracht *extra* zouden worden gecreëerd gewoon weglaten. Dan komt alles ongeveer, maar nooit precies, goed uit.

Voor de sterke kracht kon je misschien wel een renormeerbare theorie bedenken, maar die zou nutteloos zijn omdat de reeks van opeenvolgende benaderingen steeds weer geheel andere uitkomsten zouden leveren, dus eigenlijk nietszeggende onzin. Dit komt doordat die kracht zo groot is dat iedere correctieterm die je uitrekent niet kleiner maar eerder groter is dan de voorafgaande. Een situatie die je kunt vergelijken met een golfspeler die niet in staat is heel zachtjes tegen de bal te tikken. Iedere slag die hij maakt brengt de bal verder van het putje af.

'Het moet anders!' was wat de meeste onderzoekers meenden. En ze hadden er nog meer redenen voor. Het naakte deeltje in een renormeerbare theorie moet bij benadering vrij bewegen. Maar hoe moet dat dan met die quarks? Die kunnen *helemaal niet* vrij bewegen. Je kunt ze niet isoleren, of om een of andere reden gewoon niet waarnemen. Quarks zijn misschien helemaal geen deeltjes maar hersenschimmen. 'Het zijn wiskundige objecten, geen echte deeltjes; je moet zo'n theorie helemaal anders opzetten,' zo dacht men erover. En dus kwam men met alternatieve theorieën. Sommige daarvan zouden ons heel ver helpen naar de uiteindelijke oplossing, andere waren gewoon helemaal mis.

Er was eigenlijk een situatie ontstaan die zich al eerder had voorgedaan in de ontwikkeling van wetenschappelijke theorieën, en zich later opnieuw zou voordoen. Exacte wiskundige analyses van de problemen waren niet mogelijk met de kennis die men had. De enige manier om vooruitgang te boeken was het uitproberen van allerlei intuïtieve ideeën. Door de bonte

schakering van deeltjessoorten en de veelheid van geheel onbegrepen experimenteel verkregen gegevens over deze deeltjes werd ons menselijk vernuft danig op de proef gesteld. Zou een overzichtelijke theoretische beschrijving van de deeltjes wel mogelijk zijn? Niemand kon het zeggen, maar ideeën waren er genoeg, want gelukkig is er in deze wereld ook een bonte schakering van natuurkundigen.

In de eerste plaats was er de *formeel wiskundige* benadering, vooral gepropageerd door degenen die hun buik vol hadden van de renormeerbare veldentheorieën, die immers niet wiskundig exact geformuleerd waren, en bovendien toch niet van toepassing leken te zijn op de meeste deeltjes en krachten die men had opgetekend. Het enige waar je van uit mocht gaan, waren de deeltjes die we kenden, die alle in bepaalde *toestanden* mogen verkeren. Een botsingsproces of een vervalsproces kun je karakteriseren door eerst aan te geven welke deeltjes je in het begin hebt, en in welke toestanden die verkeren (de 'in'-toestand), en voorts aan te geven welke mogelijke deeltjes we kunnen krijgen ná de interactie (de 'uit'-toestand). Niet iedere in-toestand kan aanleiding geven tot iedere uit-toestand. De wetten van de quantummechanica geven je allerlei beperkingen. Zo hebben we de beperking dat de uit-toestand nooit mag ontstaan vóór de in-toestand gerealiseerd was. We noemen dit 'causaliteit', de logische volgorde van oorzaak en gevolg. Het wiskundige begrip dat in deze opvatting centraal werd gesteld heet de *S-matrix*[1].

Men realiseerde zich dat er wellicht oneindig veel soorten deeltjes konden zijn (niet alleen de deeltjes van tabel 1, maar ook de schier oneindige reeks van resonanties, die uiterst kort levende subatomaire brokstukken). Er was in deze formulering

1 'S' van 'Streuung' (verstrooiing, het botsingsproces tussen deeltjes). De toestanden worden als wiskundige vectoren gezien. Een matrix is een dubbele tabel van getallen die vectoren op vectoren kan afbeelden.

geen enkele reden om sommige van die deeltjes ‘elementair’ te noemen en andere als ‘opgebouwd uit meerdere deeltjes’ te beschouwen. Bijvoorbeeld: de delta-resonantie (‘Δ’) kan uiteenvallen in een proton en een pion. Anderzijds kan een proton, wanneer men er energie aan toevoegt (bij een botsingsproces), uiteenvallen in een delta en één of meerdere pionen. Is nu de delta samengesteld uit een proton en een pion, of is het juist andersom, bestaat het proton uit een delta en een pion? Als men uitsluitend in de *S*-matrix geïnteresseerd is, is zo'n vraag irrelevant.

Het idee werd wel de ‘bootstrap theory’ genoemd, vrij vertaald: ‘schoenvetertheorie’, naar de mythologische figuur die trachtte zichzelf in de lucht te tillen door zich aan zijn eigen schoenveters omhoog te hijsen. Een van de pioniers van deze theorie zou later als motivatie een nogal dubieuze variant van het ‘holisme’ aanvoeren: de deeltjesfamilie vormt één geheel dat je niet moet proberen in verdere basisbestanddelen te ontleden.

De onderzoekingen die volgden leverden een schat aan wiskundige gegevens op omtrent de eigenschappen van *S*-matrices. Een van de pioniers van de *S*-matrixtheorie was mijn oom, Nico van Kampen. Voortbordurend op het werk van de Nederlanders Hans Kramers en Ralph Kronig, leidde Van Kampen af dat als een *S*-matrix aan causaliteit voldoet en tevens gehoorzaamt aan de wetten van de relativiteitstheorie, er voor deze matrix vergelijkingen volgen die *dispersierelaties* worden genoemd. Door zijn eruditie en volledige toewijding aan de theoretische natuurkunde is Van Kampen een van Nederlands meest gerespecteerde theoretici, en een voortdurende inspiratie voor mij. Toen ik studeerde bleef ik hem regelmatig lastigvallen met mijn onrijpe theorieën over alles wat los en vast zat aan de fundamentele natuurkunde. Zijn reactie bestond meestal uit het beter formuleren van de vragen die als uitgangspunt werden gebruikt, zodat er maar al te vaak van mijn mooie ideeën niet veel meer overbleef.

Van Kampen ergerde zich aan de klakkeloze wijze waarop men dispersierelaties zonder bewijs ging gebruiken om eigenschappen van deeltjes te ‘begrijpen’ die op die manier niet te begrijpen waren. Hij keerde zich af van dit onderwerp. Uiteindelijk zou blijken dat de *S*-matrixtheorie alléén als uitgangspunt te schamel was om de eigenschappen van de deeltjes ook kwantitatief te begrijpen. De zeer rijke symmetriestructuur kon men niet afleiden, en de quarks bleven een raadsel.

Als we echt de ordening in de elementaire deeltjes wilden begrijpen, moest er dus een tweede ingrediënt in onze wiskundige theorieën worden opgenomen: de waargenomen *symmetriestructuur* en de *behoudswetten* waaraan de deeltjes gehoorzamen. Als vuistregel kunnen we stellen dat iedere behoudswet (behoud van energie, van totale vreemdheid, van baryongetal of noem maar op) altijd correspondeert met een ‘symmetrie’ in het systeem van deeltjes. Deze regel werd in 1918 ontdekt door de eminente vrouwelijke wiskundige Emmy Noether (1882-1935).

Als een behouden ‘iets’ zoals elektrische lading van de ene plaats naar de andere beweegt, krijgen we iets dat we *elektrische stroom* noemen. Al die andere behouden grootheden zoals vreemdheid en isospin zouden ook ‘stromen’ kunnen veroorzaken, en je zou kunnen proberen deze stromen nauwkeurig te beschrijven. In combinatie met de *S*-matrixtheorie leverde dit iets op wat we ‘stromenalgebra’ noemen. Deze stromenalgebra verschafte al gauw nieuwe interessante inzichten. Een voorbeeld is een raadsel bij het uiteenvallen van geladen pionen. Ze leveren bijna altijd een *muon* en een (anti)muon-neutrino, en bijna nooit een *elektron* (of positron) met corresponderend neutrino. Waarom niet? Het elektron lijkt immers als twee druppels water op het muon.

De reden voor deze voorkeur voor de muonen blijkt te zijn dat het uiteenvallen van het pion geheel toegeschreven kan worden aan een soort stroompje dat zich in het pion bevindt (de

axiale vectorstroom) wat op zijn beurt weer een stroompje van elektronen, muonen en neutrino's teweegbrengt. De wiskundige formules zeggen precies hoe het zit. In gewone woorden vertaald klinkt het argument ongeveer als volgt (het zou te ver voeren als ik zou proberen ook alle rimpels erin glad te strijken!).

Als een pion uiteenvalt in een elektron en een antineutrino krijgt het elektron zo veel energie mee (in verhouding met zijn eigen rustmassa) dat het bijna met de lichtsnelheid moet bewegen. Wordt het geproduceerd door een vectorstroom, dan is de draaibeweging van het elektron heel sterk gecorreleerd met zijn bewegingsrichting. Het gelijktijdig geproduceerde antineutrino, dat in tegengestelde richting wegvliegt, moet dan in dezelfde richting om zijn as draaien. Echter, het oorspronkelijke pion draaide helemaal niet (het heeft spin 0), en vanwege behoud van draaiimpuls wordt de productie van zo'n elektron-antineutrinopaar erg bemoeilijkt. Daarentegen is een muon zo zwaar dat dit laatste veel langzamer zal gaan dan het licht. Zijn draairichting kan alleen al daardoor minder precies door zijn bewegingsrichting worden beperkt. Het gevolg van een en ander is dat de uiteindelijke berekening van het productieproces een resultaat geeft dat sterk afhangt van de massa van het geproduceerde lepton. Omdat het muon ongeveer 200 keer zo zwaar is als het elektron vervallen de geladen pionen 200 × 200 = 40.000 keer vaker in muonische dan in elektronische leptonen. Einde van het argument.

Veel van dit soort verbanden had men weten te vinden in de eigenschappen van de deeltjes die verklaard konden worden met de stromenalgebra. Ook kwantitatief: de levensduur van het pion kon bijvoorbeeld berekend worden door aan te nemen dat de stromen in het pion dezelfde zijn als die in andere zwak uiteenvallende deeltjes. Toch zag het ernaar uit dat ook de in de deeltjes aanwezige stromen niet al hun eigenschappen konden verklaren. Zoals gezegd gedragen de hadronen zich min of meer als biljartballen die tegen elkaar kunnen botsen. Hoe

groot en hoe hard zijn die biljartballen? Hoe sterk trekken ze elkaar aan of stoten ze elkaar af? Het leek onmogelijk dit soort vragen te beantwoorden. Misschien moesten we terug naar de renormeerbare veldentheorie?

De theorie voor de zwakke kracht die we hadden was ontworpen door Enrico Fermi. Hij had de meest algemene formule opgesteld voor krachten die effecten teweeg kunnen brengen zoals welke we zien bij zwakke overgangen. Van de bonte schakering van mogelijkheden werden er steeds meer uitgeschakeld door te vergelijken met de experimentele gegevens. Er bleef ten slotte één formule over. Diverse onderzoekers hebben verschillende wegen bewandeld om daarop uit te komen. Terwijl George Sudarshan, Robert Marshak en Jun J. Sakurai op esthetische gronden de juiste uitdrukking opschreven, wisten Richard Feynman en Murray Gell-Mann deze ook uit de waarnemingen af te leiden en de belangrijke implicaties ervan te doorzien. De formule hield in dat een bepaald soort stroompjes die in alle deeltjes zijn te vinden tot andere stroompjes aanleiding geven en zo zwakke vervalsprocessen veroorzaken. Maar deze zogenaamde ‘stroom-stroomtheorie’ was beslist niet renormeerbaar. Als een stroom een andere stroom veroorzaakt *op dezelfde plaats* dan kun je dat zien als een kracht met uiterst korte reikwijdte. Vacuümpolarisatie vindt dan weliswaar ook plaats, maar voegt aan de naakte deeltjes *andere* krachten toe dan de reeds bestaande. En deze nieuwe krachten zijn dan oneindig. Nu weten we helemaal niet meer hoe we dan de ‘naakte’ deeltjes zouden moeten opvatten. Het gevolg van dit alles is dat als je probeert een correctie toe te voegen aan een berekening om die nauwkeuriger te maken, je in feite eerst nieuwe en willekeurige krachten moest invoeren om de oneindigheden op te heffen.

Sommigen begingen toen een vergissing die later nog vele malen herhaald zou worden (ook nu nog): men dacht dat onze wiskundige methoden misschien tekortschoten. Door de vergelij-

kingen anders op te schrijven, de correctietermen in een andere volgorde te zetten enzovoort, hoopte men de theorie zodanig te verbeteren dat de rekenuitkomsten ondubbelzinnig zouden worden. De vergissing die men dan begaat, is dat de logica van de wiskunde nooit foute vergelijkingen in goede vergelijkingen kan veranderen. En er was geen reden aan te nemen dat we de correcte vergelijkingen al hadden.

En zo was het dat er nog één strohalm overbleef: zoek een renormeerbare veldentheorie voor de zwakke kracht. Je gaat dan dus uit van een klein aantal 'fundamentele' velden, waaruit je andere velden kunt construeren door er combinaties van te nemen. Je kunt ook zeggen dat er een klein aantal 'fundamentele' deeltjes wordt gepostuleerd, waaruit alle andere deeltjes kunnen worden opgebouwd.

Door de meeste deeltjesfysici werd deze gedachte als verouderd afgedaan. Slechts een handjevol mensen zat nog serieus aan deze ideeën te sleutelen. Die renormeringsprocedure werd nu eenmaal als gekunsteld en lelijk beschouwd. Waarom sommige deeltjes fundamenteel en andere niet? Trouwens, niet een reeks van benaderingen waarin oneindige krachten elkaar moeten uitbalanceren, maar in één keer de exacte theorie wilde men hebben.

Het is opvallend dat wie in de jaren zestig sprak of schreef over renormeren, zijn verhaal meestal inleidde met uitgebreide verontschuldigingen: hij[1] wist ook wel dat renormering waarschijnlijk een doodlopende weg was, maar misschien waren die ideeën ooit nog wel eens ergens goed voor.

Het CERN, het Europese centrum voor subnucleair onderzoek in Genève, bestaat niet alleen uit immense laboratoria waar men diep in de elementaire deeltjes kan kijken, maar er is ook een grote theorieafdeling. Daar waren nog theoretici die, direct be-

1 Met 'hij' bedoel ik natuurlijk 'hij of zij', ook al is het aantal vrouwelijke theoretische natuurkundigen jammerlijk klein.

trokken bij de experimenten, beseften dat oneindige, elkaar uitbalancerende krachten een realiteit zijn en niet weg te denken uit de berekeningen die men routinematig moest doen om experimenteel waargenomen verschijnselen goed te begrijpen.

Sheldon Glashow (een naam die we nog vaker zullen tegenkomen), John Iliopoulos en Luciano Maiani publiceerden in 1969 vanuit CERN een artikel waarvan wij toen de waarde nauwelijks erkenden maar dat een zeer fundamentele rol zou gaan spelen in wat ging volgen. Zij merkten op dat als je naast de drie quarks *up, down* en *strange* een vierde invoert, de oneindige krachten veel beter tegen elkaar lijken weg te vallen. Zo'n vierde quark was al eens eerder geopperd, door Glashow samen met James D. Bjorken. Zij hadden het resulterende symmetriepatroon zo charmant gevonden dat ze de vierde quark *charm* noemden. Iliopoulos en Maiani gingen met de naam akkoord; ‘charm’ betekent immers naast ‘bekoring’ ook ‘betovering’. Als door tovenarij vielen de oneindige krachten tegen elkaar weg.

Maar het GIM-mechanisme, zoals men dit ging noemen, hield geen echte nieuwe volledige theorie in voor de zwakke kracht. Er was er maar één die zich echt helemaal ging vastbijten in het idee dat je een renormeerbare theorie voor de zwakke kracht, of eigenlijk voor alle krachten moest hebben. Martinus Veltman, nog niet lang hoogleraar in Utrecht, moest niets hebben van wiskundig gefilosofeer. Hem ging het erom hoe de werkelijkheid in elkaar zat. Vóór zijn komst in Utrecht wist, naar zijn zeggen, niemand daar nog wat een *K*-meson was. Dat zou veranderen. Veltman ging veelvuldig naar CERN en naar Parijs om te leren en te discussiëren. Hoe komt het dat die oneindige krachten zo mooi tegen elkaar wegvallen? Hoe komt het dat ondanks die oneindige krachten het effect van de zwakke kracht zo netjes de regels van de stromenalgebra eerbiedigt? Waarom lijkt het muon zoveel op het elektron? Hoe werkt nu eigenlijk dat GIM-mechanisme? Veltman raakte in diepe discus-

sies met John Bell in CERN om de diverse argumenten tegen elkaar af te wegen.

Toen ik in 1969 mijn doctoraalexamen behaald had, wilde ik doorgaan en een proefschrift schrijven in de theoretische deeltjesfysica. Daar mijn oom zich nu van de deeltjesfysica had afgewend, werd Veltman mijn leermeester.

Laat ik Veltman introduceren met een kleine anekdote. Dat hij goed thuis is zowel in de theorie van de zwaartekracht als in de perikelen van de techniek, demonstreerde hij toen hij eens als een der laatsten in een overvolle lift stapte. Toen men op het knopje drukte ging er een belletje rinkelen en een lichtje branden: *overbelast*! Omdat Veltman de zwaarste persoon was in de lift en ook een der laatsten vielen weldra alle ogen op hem. Maar Veltman vond niet dat hij uit moest stappen. ‘Als ik “ja” zeg, drukken!’ zei hij. Hij zakte door zijn knieën en maakte een voor zijn gestalte onverwachte luchtsprong. ‘JA,’ riep hij, en de lift vertrok. Toen hij neerkwam was de motor van de lift kennelijk al voldoende op gang om de reis te kunnen voortzetten.[1]

Ik ging dus veldentheorieën bestuderen. Tegen Veltman werd gezegd dat hij met zijn studenten bezig was een oud, stoffig en verlaten hoekje van de natuurkunde schoon te vegen. Hoe stoffig en verlaten leest u in het volgende hoofdstuk.

1 Ik zat ook in die lift.

10 De Yang-Millstheorie

We gaan terug naar 1954. De grote successen van de theorie voor de elektromagnetische krachten tussen de deeltjes waren nog vers. Nog niet ontmoedigd door de ontdekkingen van vele soorten deeltjes die nog in het verschiet lagen, zocht men nog naar eenvoudige, elegante en universele principes in de natuurkunde.

Alle aspecten van de elektromagnetische krachten die tussen de deeltjes heersen, kunnen worden afgeleid uit de vergelijkingen waaraan het *elektrische* en het *magnetische* veld voldoen. Deze velden zijn vectorvelden. Een ‘vector’ is een grootheid die niet alleen een *sterkte* heeft maar ook een *richting*. De windsterkte in de atmosfeer zou je een vectorveld kunnen noemen. Zo'n vector heeft drie componenten. Van de wind bijvoorbeeld kun je eerst aangeven in welke mate de lucht van zuid naar noord beweegt (of andersom, dan zet je er een minteken voor), dan ten tweede de oost-westbeweging en ten slotte de verticale component.

Bij elkaar heeft het elektromagnetische veld dus zes componenten, maar deze kun je niet alle willekeurig kiezen; ze hangen via ‘veldvergelijkingen’ met elkaar samen, zoals ook de windsnelheid weer samenhangt met de drukverdeling in de atmosfeer. Als je de drukverdeling kent dan volgt daar de windsnelheid uit. Zoiets is er ook bij het elektromagnetische veld. Je kunt het elektrische *spanningsveld* invoeren dat net als luchtdruk door slechts één getal, niet drie, wordt aangegeven. Voorts heb je nog een *vectorspanningsveld* nodig. Tezamen hebben we dus vier spanningsveldcomponenten, die ik gemakshalve bij elkaar neem en die ik ‘vectorpotentiaal’ zal noemen. Als je de volledige vectorpotentiaal kent, weet je ook wat het elektrische en het magnetische veld zijn.

Er is echter iets bijzonders aan de hand met de vectorpoten-

tiaal. Hij is niet direct waarneembaar. Preciezer gezegd: je kunt een heleboel verschillende vectorpotentiaalvelden verzinnen die alle *hetzelfde* elektromagnetische veld genereren en daarom experimenteel ononderscheidbaar worden, bijvoorbeeld, de aarde zou op een spanning van 100.000 volt kunnen staan: uit de twee gaatjes in mijn stopcontact zou dan respectievelijk 100.000 en 100.220 volt kunnen komen, het strijkijzer werkt als vanouds en ik word er niet door geëlektrocuteerd.

U zou kunnen opperen dat door die willekeur het vectorpotentiaalveld onbruikbaar is, maar het tegendeel is waar. De bewegingsvergelijkingen voor de elementaire deeltjes worden er een heel stuk eenvoudiger en eleganter door. Je moet de willekeur in de beschrijving, die we *ijkinvariantie* noemen, voor lief nemen.

In de praktijk is ijkinvariantie zelfs heel prettig. Als je een ingewikkelde berekening hebt gedaan en je ervan wilt verzekeren dat er niet ergens onderweg een foutje is gemaakt, hebben we nu een mooie controlemogelijkheid. We veranderen de vectorpotentiaal op zo'n onzichtbare manier. We noemen dat een *ijktransformatie*. Het eindresultaat (welke deeltjes werden er geproduceerd, hoeveel en in welke richting?) mag dan niet veranderen. Of het zou kunnen zijn dat er deeltjes ontstaan die we een andere *naam* hadden gegeven, maar door de experimentator niet van de vorige te onderscheiden zijn. Om het voorbeeld van het strijkijzer weer even aan te halen: als ik uitreken hoe warm het strijkijzer wordt, mag het rekenresultaat niet veranderen als ik aan beide gaatjes van mijn stopcontact 100.000 volt toevoeg.

Dit alles heet dus ijkinvariantie. IJkinvariantie loopt als een rode draad door de gehele theorie van de quantumelektrodynamica. Een soortgelijk principe hebben we ook in Einsteins theorie voor de zwaartekracht. Daar zijn het de coördinaten van de punten in ruimte en tijd die willekeurig mogen worden gekozen. Door experimentatoren waargenomen verschijnselen mogen niet afhangen van onze coördinatenkeuze.

Als ijkinvariantie zo'n belangrijk principe is in de enige twee krachtsystemen die men in 1954 goed kende dan lag het voor de hand om ook te proberen ‘ijktheorieën’ te construeren voor andere natuurkrachten. Dit was precies het uitgangspunt van een zeer elegante berekening die Chen Ning Yang samen met zijn jongere medewerker Robert Mills toen publiceerde. Achteraf bleek dat ook anderen dit idee hebben gehad. Met name Ronald Shaw, een student van Abdus Salam in Cambridge, had zijn dissertatie zo goed als voltooid toen het artikel van Yang en Mills uitkwam. De resultaten die hij in een hoofdstuk van zijn dissertatie beschreef, waren dezelfde, maar werden niet meer gepubliceerd.

Kennelijk heeft Shaw geaccepteerd dat iemand hem vóór was. Wetenschappers van onze tijd kunnen vaak veel slechter tegen hun verlies; die proberen in zo'n omstandigheid tóch hun werk gepubliceerd te krijgen, om vervolgens met veel tamtam te verkondigen dat zij de ontdekking ‘onafhankelijk’ hebben gedaan. Net als voetbal wordt ook het bedrijven van wetenschap tegenwoordig agressiever gespeeld.

Het voorstel van Yang en Mills was de groep van toegestane ijktransformaties uit te breiden. Dat kan als je het aantal vectorpotentiaalvelden uitbreidt. De eerste interessante mogelijkheid die zich voordoet, is het geval dat je in plaats van vier nu *twaalf* componenten invoert. In zo'n wereld heb je drie soorten ‘elektrische’ en drie soorten ‘magnetische’ velden, de *Yang-Millsvelden*.

Voor wat Yang en Mills voorstelden waren eigenlijk maar weinig steekhoudende argumenten aan te voeren. Hun werk moest niet gezien worden als een poging gedragingen van deeltjes te verklaren die men geobserveerd had. Waar hun berekening betrekking op had, zou je moeten opvatten als een ‘droomwereld’, met een niet bestaande eenvoud en abstractie. Dit is een soort exercitie die steeds gewoner wordt in de theoretische natuurkunde, en die bedoeld is om onze wiskundige technieken

te oefenen en aan te scherpen. We moeten dan spreken van een ‘model’. Daartegenover zou je het woord ‘theorie’ pas mogen hanteren als het model een (eventueel geïdealiseerde) beschrijving is van de werkelijkheid. In de praktijk wordt het helaas steeds meer de gewoonte om de begrippen ‘model’ en ‘theorie’ door elkaar heen te gebruiken.

Zou het Yang-Millssysteem op de werkelijke wereld van toepassing kunnen zijn? Het bleek dat in de droomwereld van Yang en Mills drie soorten fotonen bestaan. Eén daarvan is net als het gewone foton en de twee andere zijn elektrisch geladen, één positief en één negatief. Maar eigenlijk zijn ze alle drie gelijk: door ijktransformaties gaan ze in elkaar over.

Dus de vraag is: bestaan er in de werkelijke wereld elektrisch geladen deeltjes die we hiermee kunnen identificeren? Nee, zo moesten Yang en Mills tot hun spijt erkennen. Deze elektrisch geladen fotonen zouden spin één hebben, net als het gewone foton, maar rustmassa nul. Dat laatste doet de theorie de das om. Elektrisch geladen deeltjes die heel licht zijn, of zelfs helemaal geen rustmassa hebben, zouden in grote hoeveelheden uit uw stopcontact moeten komen. Omdat het zo weinig energie zou kosten om zulke deeltjes te produceren zouden ze spontaan ontstaan en proberen ieder elektrisch spanningsverschil te neutraliseren.

Elektrisch geladen deeltjes met spin één bestaan wel, maar ze hebben massa. Het bekendste voorbeeld is de rho-resonantie (ϱ) met een massa van 770 MeV. Dat deeltje was in 1954 nog niet bekend, maar men had wel vermoedens dat zoiets kon bestaan. Er zijn zowel elektrisch geladen ϱ^+ en ϱ^- resonanties als een neutrale variant, ϱ^o. Kon de theorie misschien gewijzigd worden door termen aan de vergelijkingen toe te voegen zodanig dat de massa van de Yang-Millsfotonen niet nul is maar bijvoorbeeld 770 MeV? Dat probeerden Yang en Mills wel, maar ze zagen in dat dan de ijkinvariantie verloren gaat. Dat is lelijk en bovendien was het maar de vraag of zo'n gemutileerde theo-

rie geen ongerijmdheden bevat. Kortom, de Yang-Millstheorie was aardig maar werd weldra als onrealistisch terzijde gelegd.

Toch bleef het artikel van Yang en Mills niet onopgemerkt. Diverse onderzoekers putten inspiratie uit dit fundamentele idee, dat zulke schitterende vergelijkingen opleverde waarvan men alleen niet wist waarop ze nu eigenlijk betrekking hadden. Zo was Gell-Mann duidelijk door deze theorie geïnspireerd toen hij de quarkhypothese opstelde, en ook de Feynman-Gell-Mannformule voor de zwakke kracht leek sterk te wijzen op een of ander Yang-Millsprincipe.

Dit is waarover Veltman discussieerde met Bell in Genève. Hoe komt het dat de zwakke kracht zo universeel dezelfde is voor alle soorten deeltjes? Is het niet toevallig dat ook de elektrische lading van de meeste geladen deeltjes exact dezelfde grootte heeft? (Slechts enkele hebben precies tweemaal die hoeveelheid lading). Met een Yang-Millsconstructie zou je dit alles veel beter kunnen gaan begrijpen. De Yang-Millstheorie was immers een directe uitbreiding van de theorie van het elektromagnetisme. De zwakke kracht werkt op een lading die aan een behoudswet lijkt te gehoorzamen. Dat lijkt op wat we bij elektromagnetisme ook hebben. Omgekeerd, elektrische lading komt alleen voor in gehele veelvouden van één fundamentele lading, die van het elektron. Dat nu is typisch een eigenschap die kenmerkend is voor een Yang-Millstheorie. Het lijkt evident dat je het ijkprincipe tot de zwakke kracht moet uitbreiden.

Een ander probleem was inmiddels ook door een fysicus op het CERN opgelost. De zwakke kracht voor de hadronen bleek namelijk steeds een paar procent zwakker te zijn dan die voor de leptonen. Is die kracht dan bijna maar niet helemaal universeel? Nicola Cabibbo vond de oorzaak.[1] Hij rekende voor dat

1 Maar de kern van diens betoog was al enige jaren eerder gesuggereerd door Gell-Mann en Maurice Lévy in een *voetnoot* bij een publicatie over een deeltjesmodel met zwakke krachten erin.

de gewone hadronen de zwakke kracht moeten delen met de *vreemde* hadronen. De kracht op de hadronen staat als het ware een beetje scheef, waardoor hadronen met vreemdheid door toedoen van de zwakke kracht in gewone deeltjes uiteen kunnen vallen, terwijl deeltjes zonder vreemdheid een iets kleinere kracht voelen.

Veltman besloot dat althans *iets* van die Yang-Millstheorie goed *moest* zijn. Als je die twee geladen fotonen nou maar een massa kon geven. Een algemeen geldend principe is: als je een krachtvoerend deeltje zoals een foton een zekere hoeveelheid rustmassa geeft dan wordt de kracht die het deeltje overbrengt er een van korte reikwijdte. Volgens de toenmalige theorie van Feynman en Gell-Mann voor de zwakke kracht genereert een zwakke stroom terstond en op dezelfde plek een klein ander stroompje. Alsof er een kracht is met uiterst korte reikwijdte. Algemeen bekend was dat een zeer *zwaar* krachtvoerend foton hetzelfde effect teweeg zou kunnen brengen. Dat was de theorie van het ‘intermediaire vectorboson’ van de zwakke kracht, die als een schim in onze gedachten rondwaarde. Het zou een heel zwaar, elektrisch geladen deeltje moeten zijn met spin één, het W^+ en zijn antideeltje W^-.

Ieder zwak interactieproces kun je dan zien als het resultaat van twee interacties. Eerst gaat een deeltje over in een soortgenoot (bijvoorbeeld een neutron gaat over in een proton) waarbij er een *W*-deeltje vrijkomt. Dit *W*-deeltje heeft een veel te grote rustmassa om vrij te kunnen voortbestaan. De energie hiervoor was niet beschikbaar. Het kan echter wel een tweede interactie aangaan, hetzij door een soortgelijke overgang van een ander deeltje ter plaatse, of door uiteen te vallen in een deeltje en een antideeltje, bijvoorbeeld een elektron en een antineutrino ($\bar{\nu}_e$), zie figuur 11b.

Wat gebeurt er nu precies als je aan de vergelijkingen van Yang en Mills een minimale verandering aanbrengt, juist genoeg om de geladen fotonen een massa te geven? IJkinvariantie is

dan *bij benadering* goed. Zoiets hebben we in de natuur meer gezien. Er zijn allerlei symmetrieën die slechts bij benadering gelden. Veltman verdeelde de termen in de Yang-Millsvergelijkingen in ijkinvariante termen en slechts één niet-ijkinvariante term. De rekenregels die je dan krijgt, waren al eens bestudeerd. Richard Feynman had zich er al eens op geworpen. Maar Feynmans motivatie was wel een heel andere geweest. Een van de allermoeilijkste problemen, misschien wel hét allermoeilijkste probleem in de deeltjesfysica, is het verenigen van de fysica van de quantumdeeltjes met de regels van Einsteins theorie van de zwaartekracht. Feynman wilde zijn krachten er wel eens op proberen, maar merkte dat de eenvoudigste berekeningen in die theorie algauw tot lange en onoverzichtelijke formules leiden. In een mum van tijd heb je hele rollen behangpapier met formules volgeschreven en zie je door de bomen het bos niet meer.

Ditmaal was het Gell-Mann die voor Feynman een nuttige suggestie had. Waarom probeer je niet eerst de Yang-Millstheorie? Die is technisch veel eenvoudiger en het fundamentele principe, ijkinvariantie, lijkt veel op de coördinateninvariantie van de zwaartekrachtstheorie. Alleen die massaloze deeltjes in de Yang-Millstheorie zijn vervelend. Feynman slingerde er zonder veel scrupules een massaterm tegenaan en ging aan het rekenen. Feynman was een kei in het vereenvoudigen van ingewikkelde berekeningen en argumenten. Hij ontdekte dat je de rekenregels in een veel eenvoudiger vorm kon gieten door de invoering van zogenaamde ‘spookdeeltjes’. Als deeltjes botsen, is de ‘uit-toestand’ het resultaat van allerlei krachten en effecten. Als je de diverse termen op een bepaalde manier bij elkaar veegt, kunnen de ‘Feynmanregels’ heel eenvoudig worden, maar is het net alsof er extra deeltjes een bijdrage leveren. Deze spookdeeltjes komen echter alleen maar tijdelijk in de beschrijving voor. Wat er na de botsing overblijft, zijn alleen de deeltjes die de experimentator kan waarnemen: de ‘fysische’ deeltjes.

Feynman maakte zijn werk niet af. Als je na de eerste reeks

van correctietermen naar de volgende correcties kijkt, wordt de zaak uiterst ingewikkeld. Hij publiceerde zijn resultaten alleen door een lezingencyclus te geven tijdens een zomerschool in Polen. Aantekeningen die daarvan werden gemaakt kwamen in het wetenschappelijke tijdschrift *Acta Physica Polonica*. Het was niet zo gemakkelijk meer eruit op te maken hoe Feynman zijn resultaten precies had verkregen.

Een van de aanwezigen bij Feynmans lezingen in Polen was Bryce De Witt (zoals de naam zegt, is hij een Amerikaan met Nederlandse voorouders). De Witt was niet zozeer in de Yang-Millstheorie geïnteresseerd als wel in het probleem van de quantumzwaartekracht. Het is aardig in het conferentieverslag te lezen hoe Bryce probeerde Feynman zover te brengen dat hij nu eens écht duidelijk vertelde hoe hij zijn berekeningen had gedaan. Feynman vond dat het geen zin had lange formules op het bord te schrijven als toch niemand ze kon begrijpen, maar De Witt hield aan. Ten slotte gaf Feynman zich over. ‘Ik kan ook best onbegrijpelijke dingen op het bord krijgen,’ zei hij, en toen volgden er meer details.

Uit wat daarna gebeurde, bleek dat De Witt heel goed begreep hoe Feynman te werk was gegaan. Hij ging door waar Feynman was blijven steken. Hij verbeterde de technieken en vond inderdaad de correcte Feynmanregels voor diagrammen met willekeurig veel gesloten lussen. Hij publiceerde alleen het eindresultaat in 1964, maar dit trok niet zo veel aandacht omdat de afleiding er niet bij stond en wij niet konden begrijpen wat er precies stond. Het stond er bovendien nog niet helemaal goed. In 1967 publiceerde hij de volledige afleiding wel, maar het werden drie artikelen die zo lijvig waren dat de moed je al in de schoenen zonk nog voor je begon te lezen. Pas later zouden we gaan begrijpen hoe Bryce De Witt de correcte regels had afgeleid; er waren zelfs elementen in zijn technieken die pas veel later in zwang zouden komen.

Stanley Mandelstam in Californië had een geheel eigen bena-

dering van net probleem. Hij beweerde een nieuwe formulering te hebben van de zwaartekrachts- en Yang-Millstheorie waar ook Feynmanregels uit volgden, inclusief de spookdeeltjes van Feynman.

En dan waren er groepen in Leningrad en Moskou. Ludwig D. Faddeev en Victor N. Popov kwamen met (praktisch) dezelfde rekenregels als Mandelstam. Hun argumenten waren weliswaar formeel (en daarom in Veltmans ogen verdacht) maar hun eerste publicatie erover was glashelder en heel goed te begrijpen.

Hier konden we mee werken. Maar, het een en ander klopte nog niet. De rekenregels van Mandelstam waren niet precies dezelfde als die van de Russen. En allen hadden ze een factor twee anders dan Feynman. ‘Een kniesoor die daarop let,’ zou Feynman daar later over zeggen. Hij bekommerde zich nou eenmaal nooit om zulke pietluttige details. Nu weten we dat dit verschil kwam doordat Feynmans theorie met een massaterm erin een geheel andere was dan die van De Witt, Mandelstam en de Russen, en dat was de reden waarom Feynman niet verder was gekomen.

Het was duidelijk dat de zwaartekrachtstheorie, ondanks het feit dat je misschien de formele regels kon afleiden, in de praktijk onbruikbaar zou blijven vanwege gigantische renormeringsmoeilijkheden. De vooruitzichten voor de Yang-Millstheorie leken daarentegen veel gunstiger, zoals ook later zou blijken. We laten de zwaartekracht voorlopig weer even rusten.

Wat Veltman wilde, was een Yang-Millstheorie met een massaterm erin, zodanig dat zij ook renormeerbaar is. Dat de eerste correctietermen wel in orde gebracht konden worden was nu wel duidelijk, maar de daaropvolgende zijn verschrikkelijk lastig en onoverzichtelijk. De vergelijkingen worden niet bijzonder moeilijk maar wel heel lang. Het moest mogelijk zijn deze geestdodende manipulaties met een computer te doen. In feite volgen de hogere correctietermen eenduidig uit de theorie. Wat

men deed, was eigenlijk niets anders dan het toepassen van de ‘dispersierelaties’ die ik eerder noemde in hoofdstuk 9.

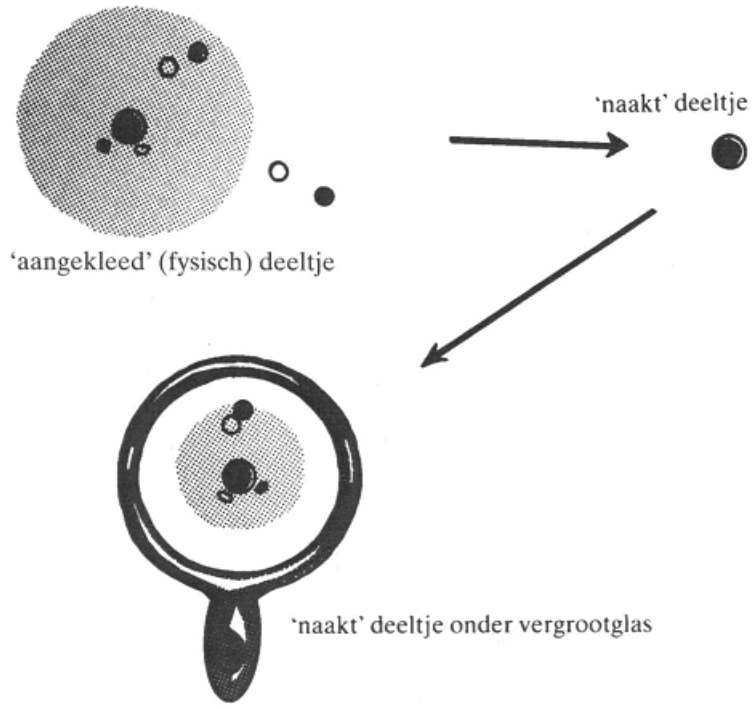
Toen eindelijk de computerprogramma's feilloos liepen, volgde er een teleurstelling: de oneindige krachten vallen niet tegen elkaar weg. Dat wil zeggen: de ‘massieve Yang-Millstheorie’ is niet renormeerbaar, en daarom onbruikbaar als theorie voor de zwakke kracht.

Hoe komt het nu eigenlijk dat sommige theorieën voor de elementaire deeltjes renormeerbaar zijn en andere niet? Om de situatie een beetje te leren begrijpen voer ik u even terug naar het eerste hoofdstuk. Daar merkten we op dat je de wereld onder een vergrootglas kunt bekijken, en dan blijkt de wereld van het kleine een kopie te zijn van de wereld van het grote. Deze situatie doet zich nu ook voor wanneer we elementaire deeltjes beschouwen. Op kleinere schaal gedragen de deeltjes zich op bijna dezelfde wijze als op grotere schaal (al moeten uiteraard alle afstanden kleiner blijven dan de afmetingen van een atoomkern). Elektromagnetische krachten bijvoorbeeld blijven aan dezelfde vergelijkingen voldoen. En wat we op grotere schaal opvatten als een ‘naakt’ deeltje, zal onder de ‘microscoop’ toch nog omringd blijken te zijn door andere deeltjes zoals fotonen. Om onder de microscoop ook weer een naakt deeltje te zien zou je het nog verder moeten uitkleden. Het is op deze manier dat de filosofie van de renormering werkt: het begrip ‘naakt deeltje’ is slechts relatief. In de praktijk blijkt dus een theorie renormeerbaar te zijn wanneer het aangeklede fysische deeltje dezelfde wetten volgt als een naakt deeltje onder de microscoop.

Alleen de massa van een deeltje blijft niet dezelfde wanneer je het onder de microscoop bekijkt (in jargon: een schaaltransformatie uitvoert). De reikwijdte van een kracht lijkt onder de microscoop veel groter; daarmee corresponderend lijkt de massa van een deeltje onder een microscoop veel kleiner. Let wel: deze situatie is dus tegenovergesteld aan die in het dagelijkse leven waar een zandkorreltje veel groter (en dus zwaarder?)

lijkt als je het onder een microscoop legt.

Een consequentie van dit alles is dat ook in een Yang-Millstheorie de massaterm zal wegsmelten wanneer we een schaaltransformatie uitvoeren. Dat betekent dat onder de microscoop de ijkinvariantie weer hersteld wordt. Dit nu is de feitelijke bron van de moeilijkheid waar Veltman op stuitte. Is het vectorpotentiaalveld van Yang en Mills nu wel of niet direct observeerbaar? Onder de microscoop niet maar in het groot wel? Dit is een contradictie waardoor de hele constructie niet goed werkte.



Figuur 9.

11 De supergeleidende lege ruimte: het Higgs-Kibblemechanisme

Een uitweg uit de moeilijkheden was er wel. Deze vindt zijn oorsprong in een heel andere tak van de theoretische natuurkunde, namelijk de fysica van metalen bij zeer lage temperatuur. Bij zeer lage temperatuur kunnen 'quantumverschijnselen' ineens heel opmerkelijke effecten teweegbrengen. Om die effecten te beschrijven gebruikt men gequantiseerde veldentheorieën, precies als in de elementaire deeltjesfysica. De *natuurkunde* van elementaire deeltjes heeft *niets* met lage temperaturen te maken, maar hun *wiskunde* lijkt er heel veel op!

Het 'veld' dat in een of ander materiaal bij zeer lage temperatuur belangrijk wordt, kan het veld zijn dat de uitwijkingen van de atoomkernen uit hun evenwichtsstand beschrijft, of het veld dat de elektronen in dat materiaal beschrijft. Bij zeer lage temperatuur krijgen we te maken met de quanta van deze velden. Zo is het *fonon* het quantum van geluid. Zijn gedragingen lijken veel op die van het foton, het quantum van licht, maar alleen de bijbehorende getallen zijn heel verschillend: fononen gaan met de geluidssnelheid, ongeveer 300 meter/sec; het foton daarentegen heeft de lichtsnelheid, 300.000 *kilo*meter/sec! De elementaire deeltjes die ons interesseren komen meestal heel dicht bij deze laatste snelheid.

Een van de meest bijzondere 'quantum'-verschijnselen die zich kunnen voordoen in sterk gekoelde metalen is de zogenaamde *supergeleiding*. De weerstand die het materiaal biedt tegen elektrische stroom wordt exact nul. Een gevolg daarvan is dat het materiaal geen enkel elektrisch spanningsverschil duldt, want dat zou ogenblikkelijk door een 'ideaal' stroompje geneutraliseerd worden. Bovendien blijkt dat ook magnetische velden in principe niet binnen een supergeleider kunnen doordringen omdat volgens de vergelijkingen van Maxwell het

aanschakelen van zo'n magnetisch veld gepaard zou gaan met inductiestroompjes. Zolang er geen weerstand tegen deze stroompjes wordt geboden, neutraliseren deze ieder magnetisch veld volledig. Er kan dan geen enkel elektrisch of magnetisch veld binnendringen in een supergeleider. Deze situatie wordt alleen anders als de geïnduceerde stroompjes te sterk worden, want dan verstoren deze de supergeleider. Dat gebeurt als men aan komt zetten met *heel sterke* magneten; tegen bruut geweld zijn supergeleiders niet opgewassen. Ze verliezen dan hun supergeleidend vermogen en laten dan het veld gewoon toe.

Waarom breng ik nu ineens de supergeleider te berde? Welnu, men kan dit materiaal opvatten als een systeem waarin het elektromagnetische veld *een veld met zeer kleine reikwijdte* is. Het wordt afgeschermd. En toch is het Maxwellveld een ijkveld. Dit maakt de supergeleider zeer interessant voor wie de zwakke kracht tussen de elementaire deeltjes wil beschrijven! Dit is nu het aardige van de theoretische natuurkunde: je kunt vaak totaal verschillende werelden met elkaar vergelijken omdat ze toevallig aan dezelfde wiskundige vergelijkingen gehoorzamen.

Hoe werkt de supergeleider? De ware oorzaak van het verschijnsel supergeleiding werd ontrafeld door John Bardeen, Leon N. Cooper en John R. Schrieffer (die hier in 1972 de Nobelprijs voor ontvingen). Er zijn twee bijzondere verschijnselen die zich kunnen voordoen bij de elektronen in een stof en die gezamenlijk tot supergeleiding aanleiding kunnen geven. Het eerste is *paarvorming*, en het andere is *Bose-Einsteincondensatie*.

'Paarvorming' houdt in dat de elektronen paarsgewijs gaan optreden. De fononen veroorzaken een kracht die de paren bijeen houdt. Twee elektronen in een paar draaien, ieder om hun eigen as, in tegenovergestelde richting, zodanig dat het paar (dat 'Cooperpaar' wordt genoemd) als geheel geen draaibeweging meer vertoont. Een Cooperpaar gedraagt zich als een

deeltje[1] met spin 0 en elektrische lading - 2.

‘Bose-Einsteincondensatie’ is een typisch quantummechanisch verschijnsel. Het kan zich alleen voordoen bij deeltjes met heeltallige spin (bosonen). Als lemmingen kunnen deze zich met z'n allen in de allerlaagste energietoestand storten die mogelijk is. U herinnert zich: bosonen doen graag allemaal hetzelfde. In deze toestand nu kunnen ze zich nog wel verplaatsen maar er kan geen energie meer aan onttrokken worden. Het gevolg is dat de verplaatsing zonder enige weerstand gebeurt. De Cooperparen verplaatsen zich dus vrijelijk, zodat er elektrische stromen kunnen zijn. Deze stromen ondervinden geen enkele weerstand meer. Een soortgelijk verschijnsel doet zich voor in vloeibaar helium bij zeer lage temperatuur. Het zijn dan de heliumkernen zelf die Bose-Einsteincondenseren. Het gevolg is dat deze vloeistof kan stromen door de allerkleinste gaatjes zonder enige weerstand.[2]

Omdat afzonderlijke elektronen spin ½ hebben, kunnen deze zelf geen Bose-Einsteincondensatie ondergaan. Deeltjes met halftallige spin (fermionen) moeten altijd alle in een *verschillende* quantumtoestand zitten, vanwege Pauli's uitsluitingsprincipe. Vandaar dat supergeleiding pas kan optreden als er paarvorming heeft plaatsgehad. Ik heb hier weer formules vertaald in woorden; vindt u die ‘quantumlogica’ niet heerlijk?

Dat supergeleiding ook voor elementaire deeltjes van belang

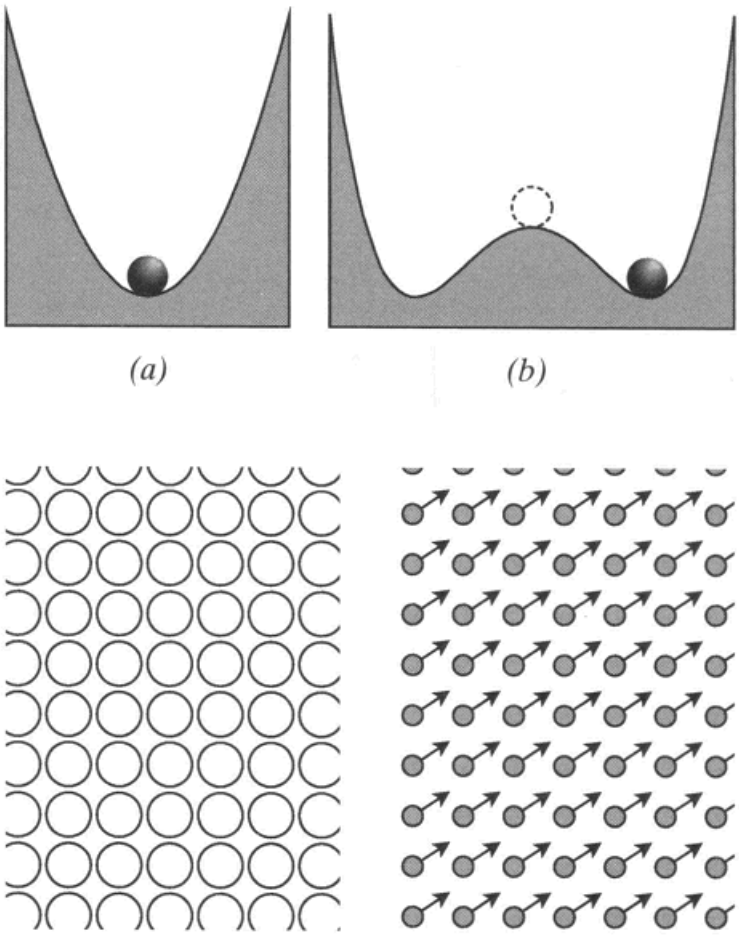
1 Merkwaardigerwijs zitten de elektronen maar heel losjes in zo'n paar. De situatie lijkt een beetje op een dansvloer waar heel wilde popmuziek wordt gedraaid: het is bij de dansparen nauwelijks meer te zien wie bij wie hoort. Schrieffer legde later uit waarom zijn theorie zo moeilijk was: het is de choreografie van een dans voor meer dan een miljoen maal een miljoen maal een miljoen dansparen.

2 Maar er geldt wel een beperking voor de stroom*snelheid*, die onder een kritische grens moet blijven. Alleen zolang de snelheid daaronder blijft, wordt er dus geen weerstand geboden.

kan zijn, werd ontdekt door de Belg François Englert, de Amerikaan Robert Brout en de Schot Peter Higgs. Zij stelden een model van elementaire deeltjes voor waarin elektrisch geladen deeltjes zonder spin Bose-Einsteincondensatie ondergaan. Deze keer echter vindt de condensatie niet plaats binnen een of andere substantie, maar in de lege ruimte (vacuüm). De krachten tussen deze deeltjes zijn dan zodanig gekozen dat het energetisch gunstiger is de ruimte te vullen met deze deeltjes dan haar strikt leeg te houden. Die deeltjes zijn dan niet direct waarneembaar. Wij zouden die toestand, waarbij de ruimte krioelt van de Higgsdeeltjes (zoals ze nu worden genoemd) maar waarbij de energie de laagst mogelijke waarde aanneemt, aanzien voor een lege ruimte.

De Higgsdeeltjes zijn de quanta van het ‘Higgsveld’. Het kenmerkende van een Higgsveld is dat de energie die erin opgeborgen is, het kleinst is wanneer dit veld een bepaalde sterkte heeft, en niet wanneer het nul is. Wat wij als ‘lege ruimte’ ervaren is niets anders dan die deeltjesconfiguratie die de laagst mogelijke energie heeft. Dit is de reden waarom in de ‘lege ruimte’ het Higgsveld een karakteristieke sterkte heeft. Als we overgaan van veldjargon naar deeltjesjargon betekent dit dat die zogenaamde lege ruimte in feite vol zit met Higgsdeeltjes. Zij zijn ‘Bose-Einstein-gecondenseerd’.

Deze lege ruimte heeft nu alle eigenschappen die ook vertoond worden in het inwendige van een supergeleider. Het elektromagnetische veld heeft er een zeer korte reikwijdte. Dit hangt dan direct samen met het feit dat het foton in deze wereld een zekere rustmassa heeft. Toch kan men in zo'n model ook aangeven hoe een ijktransformatie uitgevoerd moet worden; de velden die door de Higgsdeeltjes worden gegenereerd veranderen dan echter ook, en dat maakt de transformatie ingewikkelder. Het is vanwege de ingewikkelde, niet-symmetrische structuur van de lege ruimte zelf, dat in dit model de ijkdeeltjes massa kunnen hebben. Men noemt dit wel ‘spontane symmetriebreking’.



Figuur 10. Symmetrie en spontane symmetriebreking. Een systeem dat aan een symmetrische vergelijking voldoet, kan dan ook een symmetrische oplossing hebben (a), maar het kan ook zijn dat een minder symmetrische oplossing stabieler is (b). Ook een veld, dat een bepaalde richting kan hebben, kan een symmetrische waarde aannemen (c), of het kan zijn dat de meest stabiele oplossing van de vergelijkingen niet symmetrisch is (c). In zo'n wereld lijken alle natuurverschijnselen de oorspronkelijke symmetrie van de vergelijkingen te hebben verloren.

Nu had Higgs het nog over ‘gewone’ elektromagnetische velden. Thomas Kibble vond uit dat je ook een Yang-Millstheorie supergeleidend kunt maken, door er een spinloos deeltje met Yang-Millslading aan toe te voegen, dat dan Bose-Einsteincondensatie kan ondergaan. De Yang-Millskrachten krijgen dan ook een korte reikwijdte, en de Yang-Millsfotonen worden spin-1-deeltjes met massa.

Was dit dan niet precies de oplossing van het probleem waarover het vorige hoofdstuk ging? De Yang-Millsfotonen krijgen hun massa en het ijkprincipe blijft overeind! Ik geloof dat er twee redenen waren waarom deze benadering niet onmiddellijk de aandacht kreeg die zij verdiende.

Ten eerste vond men de theorie lelijk. Het ijkprincipe was er nog wel maar stond niet meer centraal. Het Higgsveld was er ‘met de hand bijgestopt’ en het Higgsdeeltje zelf is niet een ‘ijkdeeltje’. Als je daaraan begint, waarom dan nog niet veel meer willekeurige deeltjes en velden erbij? Men beschouwde deze ideeën als eenvoudige speelgoedmodellen zonder veel fundamentele betekenis.

Ten tweede was er het ‘Goldstonetheorema’. Deeltjesmodellen met een ‘spontane symmetriebreking’ waren al eerder voorgesteld, maar van een uitgebreide klasse van zulke modellen had Jeffrey Goldstone bewezen dat ze altijd *massaloze deeltjes zonder spin* bevatten. Vele onderzoekers dachten dat daarom ook de Higgstheorie zo'n massaloos Goldstonedeeltje moest bevatten, wat vervelend zou zijn want er bestaan voorzover we weten geen echte Goldstonedeeltjes.[1] Goldstone kon nu wel zeggen dat het Higgsmodel niet aan de voorwaarden voor zijn bewijs voldeed, zodat zijn bewijs daar niet geldig voor was, maar men liet zich zo imponeren door die mooie wiskunde dat het Higgs-Kibblemodel langere tijd weinig populair was.

Goldstone's stelling werd dus gebruikt als een ‘gaat-niet-stel-

1 Er bestaan wel *bijna*-Goldstonedeeltjes, zie het volgende hoofdstuk!

ling': als de lege ruimte niet symmetrisch is, kan dat niet anders dan met massaloze, spinloze deeltjes erin. Nu weten we dat vanwege de kleine lettertjes de stelling in dit geval buiten werking wordt gesteld; de Goldstonedeeltjes worden precies vanwege de ijkinvariantie onzichtbaar: het zijn slechts de 'spookdeeltjes' die Feynman voor het eerst tegenkwam in zijn berekeningen.

Dat je wel degelijk realistische deeltjesmodellen kunt fabriceren waarin een Yang-Millsveldensysteem verantwoordelijk is voor de zwakke kracht, en het Higgs-Kibblemechanisme voor de korte reikwijdte daarvan, was niettemin wel gesuggereerd door twee prominente onderzoekers. Eén daarvan was de Pakistani Abdus Salam. Salam zocht naar esthetische modellen voor deeltjes, en hij vond het Yang-Mills-idee zo mooi dat alleen daarom al geprobeerd moest worden dit in te bouwen in de zwakke-interactietheorie. De drager van de zwakke kracht moest dus een Yang-Millsfoton zijn, en het Higgs-Kibblemechanisme is de enige aanvaardbare verklaring voor het feit dat die drager een eindige rustmassa heeft.

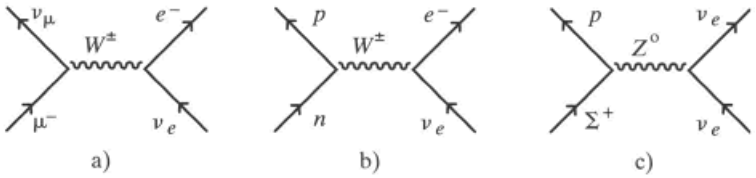
In een vergadering die werd gesponsord door het Zweedse Nobelconsortium legde Salam de ideeën die hij samen met zijn medeauteur John Ward had uitgebroed, voor. Zijn lezing, en de discussie die volgde, werd gepubliceerd, en de vraag die daarin weldra centraal kwam te staan, was of de theorie wel renormeerbaar was. Intuïtief begreep Salam dat het antwoord bevestigend moest zijn, maar de details moest hij de vragenstellers schuldig blijven. Hij was niet in staat de Feynmanregels te formuleren en hij moest erkennen dat de theorie, als je haar neemt zoals ze eruitziet, spookdeeltjes voorspelt die de boel verzieken: negatieve energieën, en/of negatieve productiekansen, beide onaanvaardbaar als je zo'n theorie sluitend wilt maken.

De andere onderzoeker die op ongeveer hetzelfde punt uitkwam was Steven Weinberg. Weinberg echter ging nog een belangrijke stap verder. Hij formuleerde in detail een eenvoudig model waarin hij precies aangaf welke velden er zijn en hoe

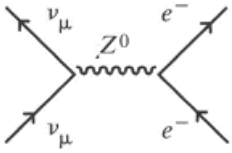
deze wisselwerken, waarbij hij zich echter tot de leptonen beperkte. Weinberg realiseerde zich dat er naast het gewone foton minstens *drie* soorten zware Yang-Millsfotonen moesten zijn: één positief, één negatief en één neutraal foton. Over de geladen fotonen was iedereen het wel eens; dat werden dan de befaamde intermediaire vectorbosonen, met een massa die volgens Weinbergs theorie meer dan 60.000 MeV moest zijn. Maar met die geladen vectorbosonen kun je praktisch *alle* zwakke interactieprocessen verklaren. Dat er dan ook naast het gewone foton (γ) nóg een neutrale component (die Weinberg Z^o noemde) nodig zou zijn, was lang niet zo vanzelfsprekend. De massa van Z^o zou nog iets meer dan die van de geladen bosonen moeten zijn. Figuur 11 geeft aan hoe men zich voorstelt dat de zwakke interacties plaatsvinden. Het was echter bekend dat 'neutrale' uitwisselingsprocessen nooit werden waargenomen. Het diagram c is om een of andere reden verboden!

Dit is een moeilijkheid als men in een neutraal Z^o-deeltje wil geloven. Nog opvallender wordt het wanneer men de levensduur van het π^- vergelijkt met die van K_{lang}. Waarom vervalt π^- wel in μ^- en ν_μ, terwijl K_{lang} gedurende zijn langere levensduur nooit via een Z^o bijvoorbeeld in μ^+ en μ^- vervalt? Weinberg zag echter dat de strenge wiskunde van het Yang-Mills-systeem wel degelijk het bestaan van een stroomcomponent voor een neutraal Z^o-deeltje vereiste. Hij veronderstelde nu dat er kennelijk nog iets niet helemaal klopte met de hadronen. Vandaar dat zijn publicatie als titel had: *Een model voor leptonen*. Voor de leptonen is de belangrijkste nieuwe consequentie van het neutrale Z^o-deeltje dat het botsingsproces $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ mogelijk werd (figuur 12).

Weinberg stelde dat zijn theorie door het experiment kon worden getoetst. Weliswaar waren er al neutrino-experimenten gedaan maar het bestaan van interacties zoals deze was nog onzeker. Overigens zou ook de mate waarin elektronneutrino's tegen elektronen botsen door de Z^o-deeltjes beïnvloed worden.



Figuur 11. Diagrammen die laten zien hoe een zwakke interactie kan ontstaan door uitwisseling van een intermediair vectorboson W^-. Het diagram a geeft aan dat $\mu^- + \nu_e \rightarrow \nu_\mu + e^-$ hetzij via de tussentoestand $\nu_\mu + W^- + \nu_e$, hetzij via $\mu^- + e^- + W^+$. Volgt men de pijltjes andersom dan zien we de interacties voor de desbetreffende antideeltjes. Het diagram geeft dan aan hoe μ^- vervallen kan in $\nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$ (het antineutrino). Diagram b geeft aan hoe $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. Diagram c geeft aan hoe een neutrale drager het Σ^+ zou kunnen doen uiteenvallen. Het weergegeven vervalproces doet zich echter niet voor!



Figuur 12. Muonische neutrino's kunnen alleen (elastisch) tegen een elektron botsen als er een neutraal Z^o-deeltje wordt uitgewisseld.

Ook Weinberg veronderstelde dat zijn model renormeerbaar zou zijn maar kon de wiskundige voorschriften niet formuleren. Dat was in 1967. Rond 1970 hadden zowel Weinberg als Salam hun belangstelling voor de Yang-Millstheorie verloren. Er kwamen theorieën voor de zwakke interactie waarbij andere diagrammen dan die van figuur 11 de hoofdrol gingen spelen; theorieën waarin je oneindig veel diagrammen had, en theorieën volgens welke negatieve kansen of een lichte schending

van causaliteit toegestaan zouden kunnen zijn. Nu, achteraf, is het gemakkelijk te zeggen waarom zulke ideeën gedoemd zijn tot falen, maar in die tijd moest men alle mogelijkheden en onmogelijkheden onderzoeken.

Werk genoeg dus voor de jonge onderzoeker. In vergelijking met anderen las ik weinig en ik dacht veel na. Dat houdt het risico in dat je er soms heel lang over doet iets te ontdekken wat achteraf al lang bekend blijkt te zijn, maar het gevolg is wel dat je de problematiek veel beter gaat begrijpen. Zo verging het mij ook bij het Higgs-Kibblemechanisme (ik geloof niet dat ik toen al wist dat het zo heette). Veltman stond heel sceptisch tegenover deze ideeën; hij was er niet van te overtuigen dat wat wij lege ruimte noemen misschien wel tot de nok gevuld is met onzichtbare deeltjes. Hij zou heel lang blijven volhouden dat hij dit onaannemelijk vond, en hij ging zelfs zwaaien met de stok die die theorie tot moes zou moeten slaan. Want zouden al deze deeltjes in de lege ruimte hun aanwezigheid niet verraden door hun zwaartekrachtsveld? Je *kunt* de theorie zo opstellen dat dat zwaartekrachtsveld precies gecompenseerd wordt door andere onzichtbare deeltjes of door een geheimzinnige bijdrage van de lege ruimte zelf. Hoe de natuur het klaarspeelt de zwaartekrachtseffecten van de onzichtbare vacuümdeeltjes zo volledig te maskeren dat wij er helemaal niets van merken, is nog steeds een raadsel dat volop in de belangstelling staat. Wat mij betreft echter moet dit probleem worden uitgesteld tot we de theorie van de zwaartekracht zelf beter begrijpen.

12 Modellen

Ik vond het Higgs-Kibblemechanisme dus mooi. Maar is het daarom ook goed? Levert dit een bruikbare theorie op? Wat mag en wat mag niet bij de elementaire deeltjes?

Diverse universiteiten in verschillende landen organiseren op internationaal niveau cursussen, ‘zomerscholen’ genaamd, waar in gerenommeerde en toch rustige recreatieoorden de experts en de studenten bij elkaar komen om lezingen te geven en aan te horen, en vooral om te discussiëren over hun vak. De bekendste zomerschool op mijn gebied was in Les Houches, een wintersportplaatsje bij Chamonix. Waarschijnlijk omdat ik me te laat had aangemeld, werd ik er niet toegelaten. Het werd dus de tweede keus: Cargèse. Ik ging erheen in 1970.

Het Institut des Sciences bij Cargèse op Corsica was opgericht door de Fransman Maurice Lévy. Op een schitterend stukje land met een strandje erbij was een laag gebouw neergezet waar vanaf 1960 zomerscholen en conferenties werden gehouden. Er werd verteld dat Lévy in een atlas had opgezocht welke plaats in Frankrijk het grootste aantal zonuren heeft. Op zo'n plek kun je de allerbeste onderzoekers uitnodigen om hun werk te komen bespreken. De studenten zouden de verleidingen van strand en zee maar moeten weerstaan. De zomerschool in 1970 zou gaan over de *sterke* interactie. Lévy had samen met Gell-Mann een model opgesteld dat althans de symmetrieën van de sterke kracht correct reproduceerde. Omdat de krachten zo sterk zijn bewegen de deeltjes zich helemaal niet meer in rechte lijnen en worden de gebruikelijke rekenmethodes onbetrouwbaar. Er zou voornamelijk over worden gediscussieerd hoe toch nog redelijk zinvolle resultaten konden worden verkregen, maar ook fundamentele aspecten van het model, met zijn oneindige reeks van benaderingen, die naar niets convergeren, zouden aan bod komen.

En het model was interessant. Het was een renormeerbaar model waarin proton, neutron en de drie pionen een hoofdrol speelden als ‘fundamentele’ deeltjes. Maar er was een vierde compagnon van de pionen nodig, dat men ‘sigma’ (σ) noemde. De symmetrie van het model vereiste dat de ‘naakte’ protonen en neutronen *massaloos* zijn. Alleen dan kon je goed begrijpen hoe de stroompjes lopen waarop de *zwakke* kracht weer kan inwerken. En nu komt het: men nam aan dat de sigmadeeltjes Bose-Einsteincondensatie ondergaan. De lege ruimte zit dus vol met sigmadeeltjes. Ook hier dus was er sprake van een ‘spontane symmetriebreking’. De protonen en neutronen, die in een symmetrische omgeving massaloos zouden zijn, zodat ze alleen met de lichtsnelheid zouden voortbewegen, worden als het ware door al die sigmadeeltjes tegengehouden; ze krijgen een massa door die spontane symmetriebreking. En voor dit systeem gold het Goldstonetheorema: de drie pionen worden Goldstonedeeltjes: zij verliezen hun rustmassa.

Dit nu is helemaal niet zo gek. Het was al eerder opgevallen dat van alle hadronen de pionen verreweg de lichtste zijn. In de meeste theorieën moet je het *kwadraat* van de massa's van de deeltjes met elkaar vergelijken. Het kwadraat van de massa van het pion is bijna 14 keer zo klein als van het eerstvolgende deeltje, het kaon. Een benadering waarin je de pionmassa gelijkstelt aan nul is zo slecht nog niet. In een verbeterde versie van het σ-model kunnen we de aanwezigheid van een kleine storende kracht veronderstellen die het pion zijn massa geeft. Later, als we de quarktheorie gaan hanteren, zullen zowel de Goldstonepionen als het sigmadeeltje ieder uit een quark en een anti-quark bestaan. De ‘storende kracht’ die het pion zijn massa geeft, blijkt dan de kleine massa te zijn die de *u*- en *d*-quarks hebben binnen een hadron, zoals aangegeven in tabel 7. Dit was in 1970 al bekend.

Twee autoriteiten op het gebied van de renormering, de Koreaan Benjamin Lee en de Duitser Kurt Symanzik, kwamen in

Cargèse vertellen hoe de renormeringsprocedure moest worden uitgevoerd in het σ-model, zodanig dat de belangrijkste eigenschap, spontane symmetriebreking, niet verloren zou gaan.

Kunt u dit nu ook als er een Yang-Millsveld is? vroeg ik zowel aan Lee als aan Symanzik. Van beiden kreeg ik hetzelfde antwoord: als ik een student ben van Veltman dan moest ik dat aan hém vragen, zij hadden zich niet in Yang-Millsvelden verdiept. Maar het drong tot me door dat de voorschriften die Lee en Symanzik voor het σ-model hadden geformuleerd, geldig moesten zijn voor ieder systeem met spontane symmetriebreking door Bose-Einsteincondensatie, zoals ook de Higgs-Kibbletheorie. Veltman, zo was mij dus bevestigd, werd als de expert op dit terrein beschouwd, maar die geloofde (nog?) niet in het Higgs-Kibblemechanisme. Hier had ik dus een kiem voor een nieuwe theorie, mijn theorie. Nu nog de uitwerking.

Veltman wist precies hoe de vereisten voor een gerenormeerde theorie voor massieve Yang-Millsdeeltjes geformuleerd moesten worden. De theorie moet een eenduidig voorschrift geven dat je in staat stelt de kansen uit te rekenen waarmee bepaalde begintoestanden evolueren tot bepaalde eindtoestanden. Die kansen, alle bij elkaar opgeteld, moeten precies één zijn. Zodra je een klein foutje maakt in de formulering komt deze berekening niet goed meer uit. Tevens moet bij iedere deeltjesconfiguratie de totale energie groter zijn dan nul, anders is de zaak niet stabiel. Dit laatste betekende dus dat het niets uitmaakt of de ‘lege ruimte’ tot de nok toe gevuld is met onzichtbare deeltjes. De totale energie is de laagst mogelijke, nul dus, en dat is alles wat je nodig hebt.

Toen ik terugkwam uit Cargèse wist ik wat ik onderzoeken wilde en waar mijn proefschrift over zou gaan. Eerst moest precies geformuleerd worden hoe de pure Yang-Millstheorie, zonder Higgs-Kibblemechanismen, gerenormeerd moest worden. Want Feynman, De Witt, Mandelstam en de Russen hadden wel Feynmanregels gegeven, maar er niet bij gezegd of en hoe deze

aan Veltmans voorwaarden voldoen. Bovendien waren er kleine verschillen in de diverse regels. Hadden ze het allen over dezelfde theorie? Waren de voorschriften eenduidig? Kon je op verschillende manieren hetzelfde uitrekenen?

Dit werd het onderwerp van mijn eerste publicatie, waar Veltman overigens een grote inbreng in had. Inderdaad bleek dat de regels van Mandelstam enerzijds en Faddeev en Popov anderzijds dezelfde theorie beschrijven en dat je de renormeringsprocedure uit kunt voeren, al ontbraken er nog stukjes in het volledige bewijs daarvan. De theorie was nog lang niet zo mooi als de quantumelektrodynamica en wat Lee en Symanzik van het σ-model hadden gemaakt, maar het begin was er. Nu nog de massa erin.

En nu was het duidelijk hoe die massa erin moest. Voor de bewijsvoeringen in het massaloze geval was ijkinvariantie absoluut essentieel. Als je de massa erin stopt zoals Veltman dat wou doen, door de ijkinvariantie te verstoren, zou niets ervan meer werken. De absoluut enige manier was via het Higgs-Kibblemechanisme. En dat werd de tweede publicatie, de constatering dat een theorie met Higgs-Kibblemechanisme erin nog steeds renormeerbaar is en dat de verfijnde technieken die Veltman mij had geleerd daarop van toepassing zijn. De eerste toepassing waar ik aan dacht, was een versie van het Gell-Mann-Lévymodel met nu ook een rhodeeltje erin. Dat immers was het soort deeltje dat Yang en Mills zelf hadden willen beschrijven (zie hoofdstuk 10), maar waarvan ze niet wisten waar zijn massa vandaan kwam. Op die manier zouden de *sterke interacties* met een renormeerbare veldentheorie te beschrijven zijn.

Maar ook al zou een dergelijk model voor de sterke kracht z'n nut hebben, een doorbraak was dat niet. Het rhodeeltje is namelijk een meson en bestaat dus uit een quark en een anti-quark. Dat klopte niet met het beeld van een rho als ijkdeeltje. Het gedraagt zich weliswaar een beetje als ijkdeeltje, maar zijn ingewanden zijn anders.

Nee, Veltman overtuigde me dat de *zwakke interactie* veel belangrijker was. Dat betekende dat je precies dezelfde vergelijkingen model laat staan voor een heel ander soort deeltjes, de *W*- en de *Z*-deeltjes, met een massa die meer dan honderd keer zo groot is als die van het rho.

In feite had ik nu het meest essentiële gedeelte van het bewijs dat het model dat Weinberg in 1967 had opgeschreven renormeerbaar was.[1] Veltman wilde het bewijs pas accepteren nadat ik een formulering kon geven van de theorie in zodanige bewoordingen dat je nooit spreekt over onzichtbare deeltjes die de lege ruimte bevolken. Dit bleef hem tegenstaan, dus transformeerde ik ze weg uit de vergelijkingen. En de nieuwe regels konden ook in zijn computerprogramma worden gestopt, waar onmiddellijk uit bleek dat alles feilloos werkte. De ontknoping van de hardnekkige problemen was gevonden!

Het toeval wilde dat er in januari 1971 een grote internationale conferentie plaatsvond in Amsterdam. De zwakke-interactietheorieën die er zouden worden besproken, waren niet alle even inspirerend. Veltman had er groot plezier in zijn nieuwe pion, mij dus, naar voren te schuiven die het kersverse bewijs kwam verkondigen van de renormeerbaarheid van de Higgs-Kibblemodellen. Er volgde een periode van zeer vruchtbare samenwerking met Veltman. Mijn ‘bewijs’ was nog lang niet overtuigend. Samen konden we de gevonden technieken verfijnen, generaliseren, vervolmaken. Ook op het gebied van dat fundamentele probleem van de quantumzwaartekracht konden we een (bescheiden) bijdrage leveren.

Op het jaar 1970 zou ik later terugzien als het jaar waarin ik twee grote ontdekkingen deed die mijn verdere leven grondig zouden beïnvloeden. De eerste heb ik zojuist beschreven. Deze leidde tot mijn benoeming als lector, en enige jaren later tot

1 Op een technisch detail na, de zogenaamde ‘anomalieën’. In de modernere versies van zijn model is dit punt ook in orde.

hoogleraar aan de Rijksuniversiteit te Utrecht. De tweede is de kennismaking met een meisje dat later mijn vrouw zou worden. Gedurende de jaren die volgden, werd ik op vele plaatsen uitgenodigd lezingen te geven over ijktheorieën, onder andere in Cargèse en Les Houches, en kreeg ik twee dochters.

De ijktheorieën werden snel populair. Benjamin Lee, Steven Weinberg en vele anderen werden enthousiaste aanhangers. Kurt Symanzik was de eerste die mij uitnodigde een lezing te geven over ijktheorieën, in Hamburg.[1]

Er was nu heel veel te doen. Allereerst, welk model van de zwakke kracht moeten we nu geloven? Want de theorie voor de zwakke kracht die Weinberg had voorgesteld, en die ik in het vorige hoofdstuk beschreef, was slechts de meest voor de hand liggende keuze. Maar lang niet de enige. En met die quarks zat het nog niet helemaal goed. Je kon dus ook andere varianten op hetzelfde thema bedenken die ook renormeerbaar zijn. Het allerbelangrijkste was dat nu ineens heel precies de *spelregels* voor het construeren van een model, of een theorie, duidelijk waren geworden. De fundamentele voorwaarden voor renormeerbaarheid van een deeltjestheorie kunnen nu als volgt worden geformuleerd:

• Er zijn fundamentele deeltjes met spin 1. Je zou ze ‘fotonen’ kunnen noemen. Deze *moeten* van het Yang-Millstype zijn. Het zijn de voornaamste dragers van krachten over langere afstanden. Alle andere deeltjes, en ook de fotonen zelf, voelen deze krachten doordat ze ‘ladingen’ hebben. De precieze wiskundige formulering hiervan maakt gebruik van de ‘groepentheorie’,

1 Ik vereerde Symanzik, en ik zal dat bezoek aan Hamburg niet gauw vergeten. Symanzik had de muren van zijn huiskamer, voorzover niet in beslag genomen door wetenschappelijke tijdschriften, helemaal behangen met posters, voornamelijk van aantrekkelijke dames. De twee grootste posters waren van ‘zijn twee helden’: Albert Einstein en Brigitte Bardot.

die ik hier niet verder uiteen wil zetten. Belangrijk is dat er slechts enkele natuurconstanten nodig zijn om alle interacties te kunnen berekenen. De waarden van de natuurconstanten zelf moeten uit experimentele gegevens worden bepaald.

• Er zijn fundamentele deeltjes met spin ½. We noemen ze ‘fermionen’, of preciezer: ‘Diracfermionen’. Er zouden vervolgens twee soorten worden ingevoerd: de leptonen en de quarks, maar in principe kunnen er ook andere fermionen zijn. Afhankelijk van de wijze waarop ze met de Yang-Millsvelden reageren kunnen ze wel of niet een ‘naakte’ rustmassa hebben. Ook deze massa's moeten uit het experiment worden bepaald.

• Er zijn fundamentele deeltjes met spin 0. Hun interacties met de Yang-Millsvelden worden bepaald door hun ladingen, maar er zijn nieuwe natuurconstanten nodig om hun onderlinge interacties en hun interacties met de fermionen te beschrijven. Als er vele spin-0-deeltjes zijn, worden dit heel veel, in principe onbekende, natuurconstanten. Meestal nemen we aan dat er slechts één of twee soorten van deze spin-0-deeltjes zijn, maar ook hun aantal ligt niet vast. Essentieel is dat deze deeltjes Bose-Einsteincondensatie kunnen ondergaan zodat we een Higgs-Kibblemechanisme krijgen. Door deze Bose-Einsteincondensatie krijgen de meeste Yang-Millsfotonen en ook de oorspronkelijk massaloze fermionen bepaalde, eindige waarden voor hun rustmassa. Omdat deze waarden altijd samenhangen met in principe willekeurige natuurconstanten kunnen we ook deze massa's meestal niet uitrekenen, maar moeten ze worden bepaald uit (directe of indirecte) experimentele gegevens.

• Er is een technische beperking: de ‘anomalieën’. Niet alle combinaties van fermionen zijn toelaatbaar. In hoofdstuk 17 vertel ik hoe dit zit.

• Fundamentele deeltjes met hogere spin zijn niet toegelaten. Wel kunnen er ‘gebonden toestanden’ zijn, bestaande uit meerdere deeltjes die om elkaar heendraaien en daardoor het geheel veel harder om zijn as laten wentelen. Alleen zo kun je dus deeltjes met spin 1½, 2, 2½ enzovoorts krijgen. (Een uitzondering zou het graviton zijn, met spin 2, en misschien wel een gravitino met spin 1½, maar deze theorieën kunnen we dan ook nog niet nauwkeurig formuleren; ze zijn niet renormeerbaar.)

U ziet, de vrijheid die er overblijft, is nogal groot. Hoeveel fundamentele deeltjes en Yang-Millsvelden zijn er eigenlijk? En hoe bepalen we uit de nu bekende experimentele gegevens welke combinatie de juiste is? Er brak nu een tijd aan die ik zou willen karakteriseren als ‘The Great Model Rush’, de stormloop op de modellen. Díe auteur die als eerste met het correcte model naar voren kwam, kon immers rekenen op een Nobelprijs, en nu waren ineens de spelregels bekend. De gekste ideeën werden geopperd.

Merkwaardigerwijs bleek echter nu onze Grote Schepper[1] over weinig fantasie te beschikken. De oorspronkelijke versie van Weinberg was goed, voorzover het de leptonen betrof. Wat de hadronen betreft, deze moeten we eerst ontleden in *quarks*. De quarks lijken zeer veel op de leptonen. Maar hoe zit het dan met de moeilijkheid die Weinberg had? Waarom werkt de neutrale component van de Yang-Millsfotonen niet in op deeltjes zoals σ^+ om deze in een proton en twee neutrino's te doen uiteenvallen? Welnu, het antwoord hierop was al gegeven door Glashow, Iliopoulos en Maiani in hun artikel van 1969. Voer een vierde quark in, genaamd ‘charme’, en de ongewenste interacties worden uitgewist. Het GIM-mechanisme was zonder meer

1 Dit woordgebruik heb ik nog van mijn natuurkundeleraar overgehouden. Er mogen geen conclusies uit getrokken worden omtrent mijn eventuele godsdienstige opvatting.

van toepassing. Wel moest dit uitdoven heel nauwkeurig gebeuren, en dat betekende dat de charmante quark niet zo heel veel zwaarder mocht zijn dan de reeds bekende quarks. In het bijzonder het K_{lang} is hier 'gevoelig' voor. Als de charmante quark erg zwaar was, zou men veel vaker een K_{lang} in twee muonen moeten zien vervallen. Slechts één op de honderd miljoen vervalt op die manier! Dit zou een belangrijke constatering zijn. Met name Glashow benadrukte dat experimentatoren moesten gaan zoeken naar deeltjes met de nieuwe quark erin, en hij probeerde aan te geven op welke verschijnselen de experimentatoren speciaal moesten letten.

Hoewel dus dankzij charme de ongewenste effecten van het Z^o konden worden geëlimineerd, kon je niettemin nieuwe verschijnselen verwachten die door het Z^o zouden worden teweeggebracht. Met name neutrino's zouden krachten ondervinden door uitwisseling van een Z^o. Als een neutrino een Z^o zou uitzenden of opvangen, zou het van richting veranderen maar wel een neutrino blijven. We noemen dat een 'elastische' botsing. Omdat er geen ladingsoverdracht plaatsvindt spreekt men ook van een 'neutrale stroom'. Als er alleen maar elektrisch geladen *W*-deeltjes waren zou het neutrino uitsluitend interacties kunnen ondergaan waarbij het in een elektrisch geladen lepton overgaat. Er vindt dan wel ladingsoverdracht plaats, en men spreekt dan van een 'geladen stroom'.

Voor het detecteren van elastische neutrinobotsingen hadden de experimentatoren reeds apparatuur beschikbaar. Sterker nog, er was al naar gezocht, maar met negatief resultaat. Betekende dit dat deze botsingsprocessen, deze 'neutrale stromen', niet bestaan? Welnu, men had elastische botsingen van muon-neutrino's tegen atoomkernen onderzocht. Dit is een geweldig moeilijk experiment, want deze neutrino's kunnen namelijk ook zodanig tegen een atoomkern botsen dat ze weliswaar in een muon overgaan, maar zo dat dit muon aan de waarneming ontsnapt. Ook kunnen ze een *neutron* maken, dat

even verderop een interactie veroorzaakt die moeilijk is te onderscheiden van de gezochte *neutrino*-interactie. Als je probeert elastische neutrinobotsingen in een experimentele opstelling te detecteren, zul je daarom altijd wel verschijnselen zien die daarop lijken, maar die niet datgene hoeven te zijn waarnaar je zoekt.

Dit alles was natuurlijk aan de experimentatoren bekend. De moeilijkheid is nu een schatting te maken van de sterkte van deze en andere ‘stoorzenders’, die we van de waargenomen gebeurtenissen moeten aftrekken om zo het echte ‘signaal’ vast te stellen. In 1972 was de vigerende opinie onder de experimentatoren dat het signaal ‘waarschijnlijk’ niet bestond.

Nu de theoretici echter ineens zo gebrand bleken te zijn op meer zekerheid hierover, erkende men dat er in feite slechts sprake was van één experiment, en dat de conclusie daarvan nog niet zo overtuigend was. Gelukkig diende zich een goede mogelijkheid aan om het experiment met veel grotere nauwkeurigheid over te doen. In het CERN was een nieuwe, reusachtig grote, deeltjesdetector in gereedheid gebracht. In een tank gevuld met freon en omgeven door duizenden tonnen staal en koper konden de sporen van kleine belletjes veroorzaakt door snel voortvliegende elementaire deeltjes zichtbaar worden gemaakt en gefotografeerd. Het apparaat heette ‘Gargamelle’, naar de moeder van de reus Gargantua in het verhaal *Gargantua et Pantagruel* van Rabelais.

Paul Musset was een van onderzoekers die begon met het tijdrovende werk om duizenden foto's te analyseren. De eerste aankondigingen van de resultaten hiervan gingen nog met onzekerheden gepaard. De eerste succesmelding werd weer ingetrokken, zodat critici spottend opmerkten dat de neutrale stroom steeds aan en uit ging. Een neutrale wisselstroom wellicht? In 1974 echter kon na uitvoerige analyse met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid gesteld worden dat het bestaan van neutrale stromen bevestigd was. Directe elastische

botsingen tussen neutrino's en elektronen zijn zeer zeldzaam. Analyses van CERN-gegevens door Hellmut Faissner in Aken leverden niettemin overtuigende plaatjes op van elektronen die plotseling door een neutrino uit hun atoom werden gerukt.

Is hier nu echt de theorie mee bevestigd, of zijn de experimentatoren bezweken onder de druk van de theoretici? Is het resultaat echt of slechts vermeend? Dit laatste wordt wel eens gesuggereerd door wetenschapscritici en -historici. Als de theorie het niet wil, zien ze het niet, en als de theorie het vereist zien ze het ineens wel?

Ik wil hier twee dingen over zeggen. Ten eerste, de verdenking zo bevooroordeeld te zijn is een zeer ernstige beschuldiging aan het adres van elke zichzelf respecterende experimentator. Een goede experimentator zal de nauwkeurigheid van zijn resultaat eerder onderschatten dan overschatten, zeker als het om een zo essentiële waarneming gaat. Helaas gebeurt het natuurlijk wel eens dat iemand zijn nauwkeurigheid overschat. Meestal zullen zijn collega's er dan als de kippen bij zijn om hem dat onder de neus te wrijven. Zelfs als de theorie het resultaat ‘wil’.

Ten tweede, het resultaat was juist. Andere waarnemingen zouden later langs geheel andere weg vaststellen dat de metingen tot in details klopten. Er zijn wetenschapsfilosofen die menen dat iedere wetenschappelijke ontdekking in hetzij de nabije hetzij de verre toekomst wel weer door ‘wetenschappelijke revoluties’ onderuitgehaald zal worden, en dat er daarom geen ‘absolute waarheid’ bestaat. Eén van hen meende dat ook het al of niet bestaan van neutrale stromen slechts een kwestie was van ‘de opinie van de onderzoekers van dit moment’, en niet als een voor eeuwig vast te stellen waarheid behoefde te worden gezien. Jawel, zo zal ook de theorie van de ‘platte aarde’ wel weer eens de kop opsteken. Het bestaan van neutrale stromen is echt niet minder objectief vast te stellen dan de bolvorm van de aarde.

We kregen dus steeds meer duidelijkheid over een schitterende theorie voor de zwakke kracht. Het model van Weinberg had standgehouden in het licht van de nieuwe experimenten. Dat hun voorspelling over de ‘neutrale stroom’ uitgekomen was, gaf de theoretici moed. Maar in de quarktheorie hadden we echt een vierde quark nodig, ‘charme’, en er was nog geen enkel deeltje gedetecteerd dat een charmquark zou kunnen bevatten. Om het GIM-mechanisme goed te laten functioneren hadden we een charmquark nodig die een niet al te grote massa heeft. En dat zou betekenen dat het mogelijk moest zijn deeltjes met charme binnen korte tijd in de grote laboratoria te produceren en te bestuderen. Dat was dus de nieuwe voorspelling. Deze zou weldra helemaal uitkomen.

13 De kleurtheorie

Heel wat onoverzichtelijker en ongrijpbaarder leken nog steeds de sterke krachten. Wel leerde men met nieuwe versnellers diverse deeltjes steeds harder, met steeds meer energie, tegen elkaar aan te kogelen, waardoor men een steeds betere kijk kreeg op de merkwaardige structuur van de hadronen. Het eerste dat opviel, was dat de lijst van ‘resonanties’ steeds langer werd. Een resonantie kan men het best omschrijven als een deeltje dat in allerlei opzichten lijkt op één van de deeltjes in tabel 1. Alleen de massa is groter en meestal is de spin ook groter. Er zijn baryonische en mesonische resonanties. Zonder het totaal aan de quantumgetallen S (vreemdheid) en I_3 (isospin) te veranderen kunnen ze in lichtere deeltjes uiteenvallen in zo'n 10^{-23} seconde.

De resonanties leken in series voor te komen. De zwaardere (dus meer energetische) deeltjes in zo'n serie hebben een grote spin, dus ze draaien heftiger om hun as dan de lichtere. Stel nu eens dat ook deze resonanties opgebouwd zijn uit zoiets als ‘quarks’. De heftige draaizin (om precies te zijn: het impulsmoment) van de zwaardere resonanties zou je dan alleen kunnen begrijpen als de quarks daar in grotere cirkels om elkaar heen draaien, omdat ze zelf namelijk niet sneller mogen bewegen dan het licht. En toch worden die quarks niet van elkaar losgeschud.

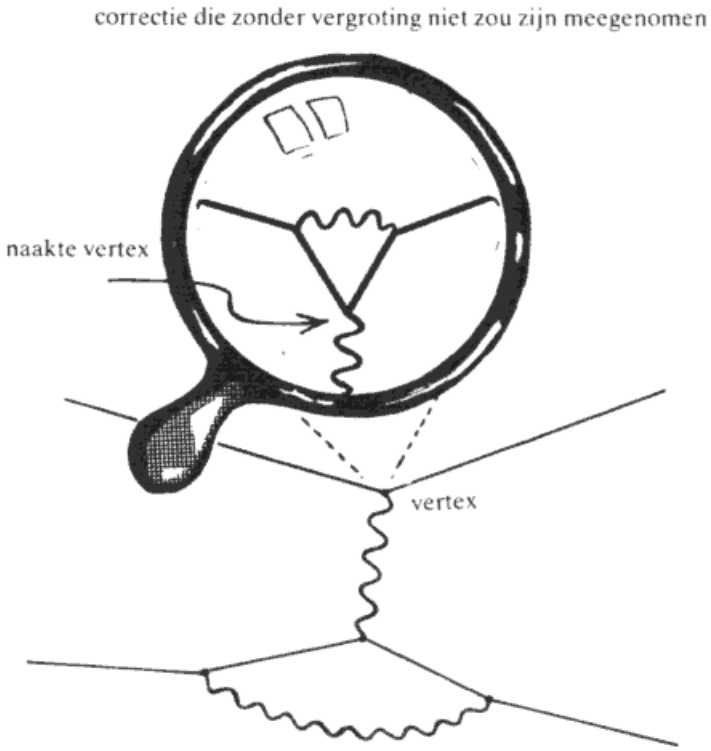
Zonder te pogen een antwoord op deze vraag te vinden ontdekte Gabriele Veneziano een eenvoudige wiskundige formule die op een bijzonder elegante manier de effecten van de resonanties op de botsingen tussen deeltjes weergaf. Het bijzondere van zijn formule was dat de uitwerkingen van de sterke kracht er heel realistisch in werden beschreven (dat wil zeggen, redelijk goed in overeenstemming met de experimentele gegevens), terwijl geen enkele bestaande theorie de formule kon verklaren. Nog niet. De formule zou een heel belangrijke rol

gaan spelen en ik kom er nog op terug.

Voeren we de botsingsenergie nog verder op dan komen er zo veel deeltjes en resonanties vrij (die alle onmiddellijk weer in gewone deeltjes uiteenvallen) dat deze niet allemaal meer duidelijk te onderscheiden zijn. Maar dan is er iets anders dat ook opvalt. Stel dat de sterk wisselwerkende deeltjes uit een soort geleiachtig materiaal waren gemaakt. Als ze met zeer veel kracht tegen elkaar aangesmeten worden, zou je verwachten dat ze elkaar weliswaar volledig vernielen, maar dat de brokstukken ongeveer in dezelfde richting door zouden gaan, in de *voorwaartse richting* dus. Dat gebeurt ook vaak. Echter, wat de experimentatoren ontdekten, is dat soms ook brokstukken met grote kracht in zijwaartse richting worden gegooid. *Alsof er kleine harde pitjes in die gelei zitten*! James Bjorken ontdekte dat die zijwaartse beweging dan aan enige simpele vergelijkingen gaat voldoen: de botsingsprocessen bij heel hoge energie en iets minder hoge energie gaan steeds meer gelijkenis vertonen. Men ging dit 'het schaalgedrag van Bjorken', ofwel *Bjorken scaling* noemen.

Feynman was geïntrigeerd door dit verschijnsel. Bjorken-scaling zou je namelijk wél met een 'gewone' veldentheorie kunnen begrijpen. Neem nou eens aan dat de resonanties uit fundamentele bouwsteentjes bestaan. Dat hoeven de quarks niet te zijn, waarschuwde Feynman; hij noemde ze 'partonen'. Als je nou aanneemt dat deze 'partonen' zich betrekkelijk vrij binnen zo'n resonantie kunnen bewegen, dan kon je Bjorken-scaling verklaren.

Quarks of partonen, vrij bewegend of onmogelijk los te krijgen? Het raadsel was compleet. Ik begreep niets van dit alles en besloot me dan ook verre te houden van de sterke kracht. En dat terwijl ik het antwoord op het raadsel van de Bjorken-scaling in mijn rekenschriften had staan! Ik had de massaloze Yang-Millstheorie goed bestudeerd, en iets opgemerkt waar ik de eerste tijd verder weinig aandacht aan besteedde. Het be-



Figuur 13. De definitie van een fundamentele interactie hangt van de vergrotingsfactor af.

treft de schaaltransformatie, die in hoofdstuk 1 werd besproken. U weet wel, je kunt de wereld van het grote in het klein nabootsen. Sommige details gaan er dan anders uitzien, andere niet. We vinden zoiets bij de elementaire deeltjes weer terug! Als je een theorie met deeltjes onder een microscoop beschouwt dan zie je dezelfde deeltjes weer. Vooral als je geen massa had in je theorie, dan lijken de deeltjes in de microscoop heel erg veel op de oorspronkelijke. Alleen als je renormering toepast gebeurt er iets. De naakte deeltjes zijn een beetje anders dan de aangeklede deeltjes, en daarom is de interactiesterkte tussen de deeltjes een beetje anders wanneer je ze onder de microscoop bekijkt.

Nu waren we van de oudere theorieën gewend dat de interactiesterkte onder de microscoop altijd *sterker* is dan op grotere schaal. De naakte deeltjes reageren heftiger dan de aangeklede deeltjes, omdat de deken van 'vacuümdeeltjes' waarin ze zich hullen de lading van de naakte deeltjes gedeeltelijk afschermt. Dat bleek bij *alle* veldentheorieën zo te zijn, *behalve* de nieuwe theorieën: de ijktheorieën gebaseerd op het idee van Yang en Mills. Daar is het net andersom, maar omdat die theorieën nieuw waren wisten de onderzoekers dit nog niet.

Op nogal raadselachtige wijze wordt het naakte deeltje op zodanige wijze omgeven door Yang-Millsfotonen uit het vacuüm dat deze de lading versterken, niet afschermen. Als je haar voor het eerst uitvoert is de berekening nogal bewerkelijk, maar ik kende het verschijnsel, in 1972. Bovendien wist ik dat als de theorie behalve de Yang-Millsfotonen ook nog fermionen bevat, deze weer de andere kant op werken. Heb je meer dan 16 fermionsoorten (maar dat getal is voor verschillende ijktheorieën verschillend) dan werkt de 'vacuümdeken' weer als in de oudere theorie.

In 1972 was er een kleine conferentie in Marseille. Op het vliegveld kwam ik Kurt Symanzik al tegen, en hij vertelde waar hij mee bezig was. Hij probeerde Bjorken-scaling te verklaren

met een veldentheorie. Maar Symanzik zou zich nog langere tijd uitsluitend met spin-0-theorieën bezig houden, die hij als het prototype voor alle renormeerbare veldentheorieën beschouwde. ‘Als nu maar dat schaalgedrag kon worden omgekeerd,’ zei hij, ‘dan zou je een theorie krijgen waarin de deeltjes in kleine omgeving zich als vrije deeltjes gedragen, maar op grote afstand zouden ze sterke krachten op elkaar uitoefenen.’ ‘Nou,’ riep ik uit, ‘dat is precies wat je krijgt in de ijktheorieën van Yang en Mills!’ Symanzik was daar nogal sceptisch over. Ik had me vast ergens in m'n berekening vergist met een minteken, meende hij. ‘En als dat niet zo is, moet je dat resultaat snel publiceren, want dan is het belangrijk.’

Ik heb er spijt van dat ik die raad niet heb opgevolgd, maar ik was toen bezig met een ingewikkelde berekening over de zwaartekrachttheorie, en ik wist niet precies hoe ik mijn resultaat zou moeten presenteren; ik wist immers niets van de sterke kracht af. Maar ik ben Symanzik wel dankbaar. Hij eindigde zijn voordracht in Marseille met de woorden: ‘Het lijkt alsof geen enkele theorie Bjorken-scaling kan verklaren, maar misschien moeten we nog eens kijken naar de ijktheorieën.’ En zo stelde hij mij volop in de gelegenheid bij de discussie die volgde op te merken dat ik die berekening al had gedaan, waarna ik de uitkomst op het bord schreef.

De eerste publicatie over het bijzondere schaalgedrag van ijktheorieën kwam van David Politzer, een jonge onderzoeker aan Harvard, en gelijktijdig van David Gross en Frank Wilczek in Princeton. Zij noemden dit ‘asymptotische vrijheid’.[1] Het was Symanzik die iedereen die het maar horen wilde, liet weten dat ik dit resultaat veel eerder al publiekelijk had verkondigd

1 Later, in een grote internationale vergadering, zou J. Iliopoulos hierover zeggen: ‘En zoals altijd wanneer iemand over vrijheid praat, wordt er in werkelijkheid iets anders mee bedoeld!’ Dat klonk nogal wrang uit de mond van iemand wiens land op dat moment door een militaire junta werd geregeerd.

tijdens de conferentie in Marseille. ‘Dat geldt, als het om de prioriteit gaat,’ zei hij.

Van de grote legpuzzel die de natuur ons biedt, was dit een nog ontbrekend stukje. Andere stukjes waren al eerder gelegd. Gell-Mann had er samen met Harald Fritzsch al op gewezen dat Yang-Millskrachten bij uitstek geschikt zijn om de binding tussen quarks te beschrijven. Ook de veelzijdige Japanner Yoichiro Nambu had dit idee. Je kunt dan namelijk begrijpen waarom juist hetzij drie quarks, hetzij één quark en één antiquark bij elkaar kunnen blijven zitten, en ook waarom de baryonen met spin 1½ een decuplet vormen en die met spin ½ een octet.[1] Je hebt dan een stelsel van precies *acht* elektrische en magnetische vectorvelden nodig (de achtvoudige weg, alweer).

De ladingen die de quarks hebben zijn een beetje ingewikkelder dan gewone elektrische en magnetische ladingen, waar je alleen maar spreekt van plus en min, die elkaar kunnen neutraliseren. Wie voor het eerst de analogie met ‘kleur’ aanvoerde weet ik niet, maar zij ligt erg voor de hand. Iedere quarksoort (*up, down, strange*, ...) kan een ‘kleur’ hebben: rood, groen of blauw. Quarks met verschillende kleuren trekken elkaar aan, en vormen dan klonters die een mengkleur hebben. De enige klonters die vrij in de natuur voor kunnen komen zijn echter een zodanig mengsel van quarks dat ze ‘kleurloos’ zijn geworden (wit of een grijstint) volgens de regel rood + groen + blauw = wit.

1 Er was namelijk nog een moeilijkheid in de oude quarktheorie. Ondanks het feit dat hun spin ½ moest zijn, lijken ze zich namelijk helemaal niet als fermionen te gedragen. In het decuplet bijvoorbeeld zit het omega-min, dat drie dezelfde quarks bevat met hun spins in dezelfde richting. Dat was verboden vanwege Pauli's uitsluitingsprincipe voor fermionen! Nu echter in de nieuwe theorie de quarks in deeltjes zoals omega-min alledrie een verschillende kleur hebben, *moeten* ze juist de octetten en decupletten vormen precies zoals we die bij de baryonen zien.

De antiquarks hebben de *geconjugeerde* kleuren: zeegroen, violet of geel. De Yang-Millsfotonen worden *gluonen* genoemd (‘glue’ = lijm). Zij dragen zowel een kleur als een antikleur. Dat kan op negen manieren, maar één van de combinaties kan kleurloos genoemd worden en doet daarom niet mee, zodat er acht gluonsoorten zijn.

Quarks, antiquarks en gluonen tezamen zijn dus Feynmans partonen. En hoe zit het met het Higgs-Kibblemechanisme? In de begintijd dacht men erover de theorie voor de sterke kracht net zo te construeren als die voor de zwakke kracht; de ‘naakte’ gluonen hebben dan geen rustmassa. Maar zulke massaloze vectordeeltjes zijn er niet in de vrije natuur. Dus moesten ze een massa krijgen via het Higgs-Kibbleformalisme. Maar, wacht eens even, deeltjes *met* massa en de eigenschappen van gluonen (zoals hun kleuren) zijn er óók niet!

Het antwoord moest anders zijn. Nu weten we dat er bij de sterke kracht helemaal geen sprake is van een Higgs-Kibblemechanisme. Er is een principe dat ieder deeltje of iedere gebonden toestand van deeltjes waarvan de totale kleur niet volledig is geneutraliseerd, verbiedt. Wanneer men zou proberen uit een kleurloos brouwsel een deeltje of wat dan ook met kleur te isoleren, dan heeft datgene wat achterblijft de geconjugeerde kleur. De aantrekkende kracht tussen kleur en geconjugeerde kleur is zo groot dat de energie die nodig zou zijn om ze te scheiden *oneindig* is. Zo'n isolatieproces is daarom onmogelijk. In 1973 begrepen we nog niets van de diepere wiskundige achtergrond van dit principe, maar het was niet moeilijk er een naam voor te bedenken: ‘confinement’, ofwel permanente opsluiting. Onze volgende taak was het verschijnsel van de quarkopsluiting te begrijpen en te verklaren.

En nu kom ik terug op de wonderbaarlijke formule van Veneziano die ik in het begin van dit hoofdstuk noemde. Op dit gebied had de Deen Holger Nielsen samen met Ziro Koba vorderingen gemaakt. Nielsen, maar ook anderen zoals Nambu,

hadden ontdekt wat deze formule nu eigenlijk voorstelt. Die formule krijg je namelijk ook als je alle hadronen voorstelt als stukjes touw, met quarks aan hun uiteinden. De touwtjes zijn van een soort supermateriaal gemaakt. Ze zijn altijd heel strak gespannen, zodat het veel energie kost om ze uit te rekken. Als je zo'n touwtje toch weet uit te rekken, wordt de geleverde energie meteen gebruikt om meer touwmassa van te maken. Zo kun je het touw onbeperkt blijven uitrekken. Het wordt steeds langer en de spanning neemt niet af! Als quarks met zulke ideale stukken elastiek aan elkaar verbonden zijn, is het geen wonder dat ze niet van elkaar af kunnen komen.

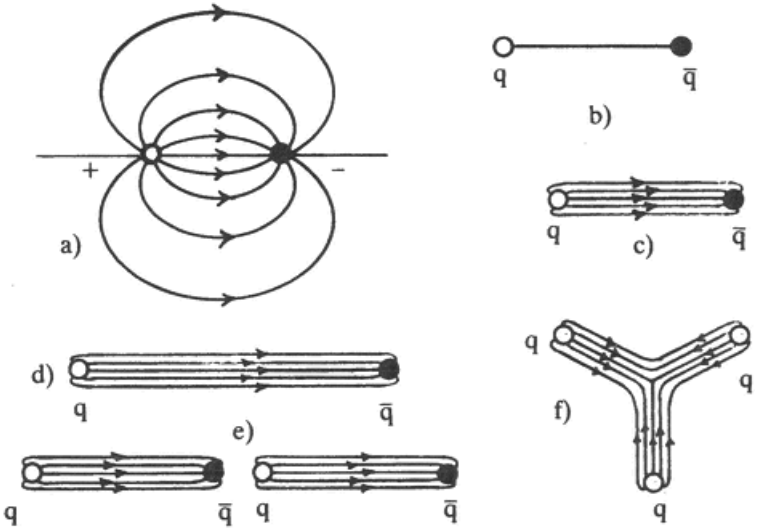
Het ingeburgerde Engelse woord voor het touwtje dat de quarks bij elkaar houdt, is ‘string’, maar mijn uitgever heeft liever dat ik dit netjes in het Nederlands vertaal, en ik zal het dus over ‘snaren’ hebben. Als je de snaar heel ver uitrekt wordt hij langer, maar er kan ook iets anders gebeuren. Hij kan namelijk best knappen, maar niet zonder dat er weer een quark en een antiquark aan de nieuw ontstane uiteinden worden gezet. Uiteinden zonder quarks of antiquarks eraan bestaan dus niet. En altijd als er een quark aan het ene uiteinde zit, zit er een antiquark aan het andere uiteinde.

Baryonen, die uit drie quarks bestaan, krijg je door toe te staan dat drie snaaruiteinden op bepaalde wijze aan elkaar kunnen worden geknoopt. De spankracht van een snaar is een natuurconstante: alle quarks worden bijeengehouden door een kracht van ongeveer 14 *ton*.

Ogenschijnlijk lijkt deze snarentheorie niet te rijmen met de theorie die zegt dat quarks bijeengehouden worden door ijkvelden. Maar de Venezianoformule was slechts *ongeveer* goed, zij is niet exact waar. Het ligt voor de hand te vermoeden dat de omschrijving in termen van touwtjes met quarks aan de uiteinden slechts een benadering is. Wat we nu geloven is dat de *veldlijnen* van het ijkveld tussen de quarks een patroon vormen zoals geschetst in figuur 14c. Als je probeert de quarks uit elkaar

te trekken wordt de toegeleverde energie gebruikt om meer veldlijnen tussen de quarks te creëren.

Misschien vindt u deze verklaring acceptabel, en de plaatjes van figuur 14 mooi en overtuigend. Maar er is een belangrijk probleem. De berekeningen die ik eerder heb genoemd, zoals het magnetische moment van het elektron, de renormeerbaarheid van de zwakke kracht en het verschijnsel ‘asymptotische vrijheid’, konden met grote precisie worden verricht. Je begint met een volledig stelsel vergelijkingen, waarvan je om een of andere reden gelooft dat ze iets interessants beschrijven (een model dus), en je leidt dan met wiskundige precisie de eigenschappen af die je wilt begrijpen.



Figuur 14. a) Veldlijnen tussen twee ladingen in de Maxwelltheorie voor elektromagnetisme. b) Snarentheorie. c) Het gluonveld tussen quark en antiquark. d) Bij uitrekken wordt er meer veld gecreëerd, tot er (e) een nieuw quark-antiquarkpaar wordt gecreëerd. f) Het baryon. q = quark, $\bar{q}$ = antiquark.

En zover was het nog helemaal niet met net verschijnsel quarkopsluiting. We konden de vergelijkingen opschrijven: een Yang-Millstheorie met kleurfotonen en fermionen, dat wil zeggen quarks, precies volgens de regels van hoofdstuk 12. We konden laten zien dat die theorie renormeerbaar is en asymptotisch vrij. Dat laatste betekent dat de krachten relatief klein worden voor quarks die heel dicht bij elkaar komen. Omgekeerd, als quarks zich ver van elkaar verwijderen, nemen de krachten minder snel af dan bij een elektromagnetische theorie. Tot zover stond alles onomstotelijk vast. Maar waarom vormen de krachtlijnen snaren? Waarom wordt de energie die nodig zou zijn om de quarks uit elkaar te halen oneindig groot? Bij deeltjes die elkaar elektrisch vasthouden (zoals atomen in moleculen) zou dit de ionisatie-energie zijn. Waarom is dus voor de quarks deze ionisatie-energie oneindig groot? De plaatjes van figuur 14 zijn suggestief, maar zijn ze goed? *Volgen* ze uit de vergelijkingen waar we in geloven? Helaas, juist omdat de krachten groot worden, worden de berekeningen onbetrouwbaar.

Dit is het zogenaamde quarkopsluitingsprobleem. Zoals ik de zaken nu zie, moet je de oplossing van dit probleem in twee gedeeltes splitsen. Ten eerste moet je een algemeen scenario vinden, een nauwkeurige beschrijving van deze merkwaardige eigenschap van de theorie. We hebben hier te maken met een *fasetoestand*, vergelijkbaar met de vaste, vloeibare of gasvormige toestand van gewone materie, of met supergeleiding of het Higgs-Kibblemechanisme. De *confinementfase* is een toestand waarin de fotonen niet een massa krijgen en de ladingen afschermen, maar de ladingen oneindig sterk aan elkaar binden. In deze zin zouden we quarkopsluiting later goed gaan begrijpen, en ik kom er nog op terug.

De tweede vraag is of deze fasetoestand inderdaad optreedt, en onder welke voorwaarden. Deze vraag is heel wat moeilijker, vergelijkbaar met de vraag welke materialen bij

zeer lage temperatuur supergeleidend worden en welke niet. Welke materialen zijn vloeibaar en welke vast, en bij welke temperatuur? Dat moet volgen uit de basiskrachten tussen de atomen of elementaire deeltjes onderling. Het antwoord hangt van zeer technisch ingewikkelde en uitgebreide berekeningen af, meestal gedaan met grote computers. Met pen en papier gaat het niet meer, omdat de krachten tussen de deeltjes zo groot zijn dat geen enkele eenvoudige benaderingsmethode betrouwbaar meer is. Zelfs de berekeningen die men nu (2002) doet met de allergrootste computers geven uitkomsten die nog helemaal niet zo erg nauwkeurig zijn, maar alles wijst erop dat quarkopsluiting inderdaad optreedt in een kleurijktheorie.[1]

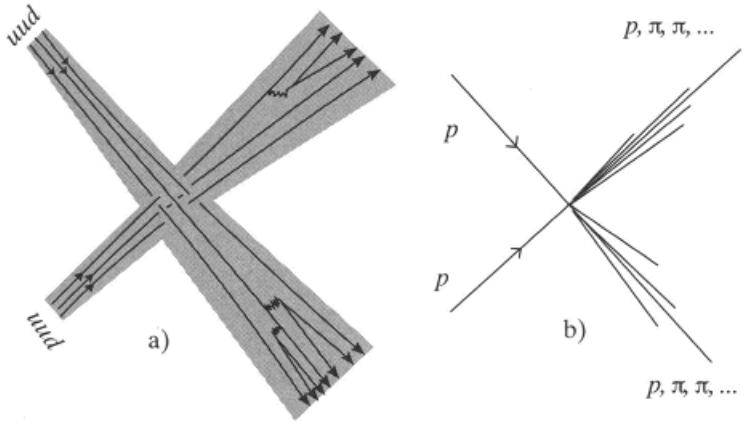
Rond 1974 begon het idee van een pure kleurijktheorie voor de sterke kracht, *zonder* spin-0-deeltje en zonder Higgs-Kibblemechanisme, steeds meer aanhang te krijgen. De theorie werd *quantumchromodynamica* genoemd, naar het Griekse *χρῶμα* = kleur.

Deze theorie drong eigenlijk langzaam maar zeker tot de onderzoekers door. Niet één naam, maar vele zijn eraan verbonden. Heel anders dan het ontstaan van de relativiteitstheorie en de quantummechanica, maar niet minder revolutionair! Want wat is er allemaal door veranderd! Slechts één fundamentele natuurconstante was nog onbepaald in de fundamentele vergelijkingen van de theorie. Daarna hoefde je alleen nog maar de massa's van de quarks aan te geven, en alleen als deze veilig bij elkaar zitten zijn de massaparameters van enige betekenis; verder zijn ze onbelangrijk. Dat betekende dus dat je alle eigenschappen van de hadronen zou moeten kunnen uitrekenen! Nog maar enige jaren terug had niemand van de aanwezigen in onze zomerschool in Cargèse zo'n theorie voor mogelijk gehouden.

Dat de theorie maar langzaam populair werd was wel te begrijpen. Want al waren de berekeningen *in principe* mogelijk, het zou nog jaren duren voordat de grote computers resultaten

te zien gaven die ergens op leken.[1] Wel werden er voorspellingen gedaan. De sterke kracht zou, op heel kleine schaal gezien, zich als een zwakke kracht manifesteren. Maar hoe kun je dat in een experimentele opstelling controleren?

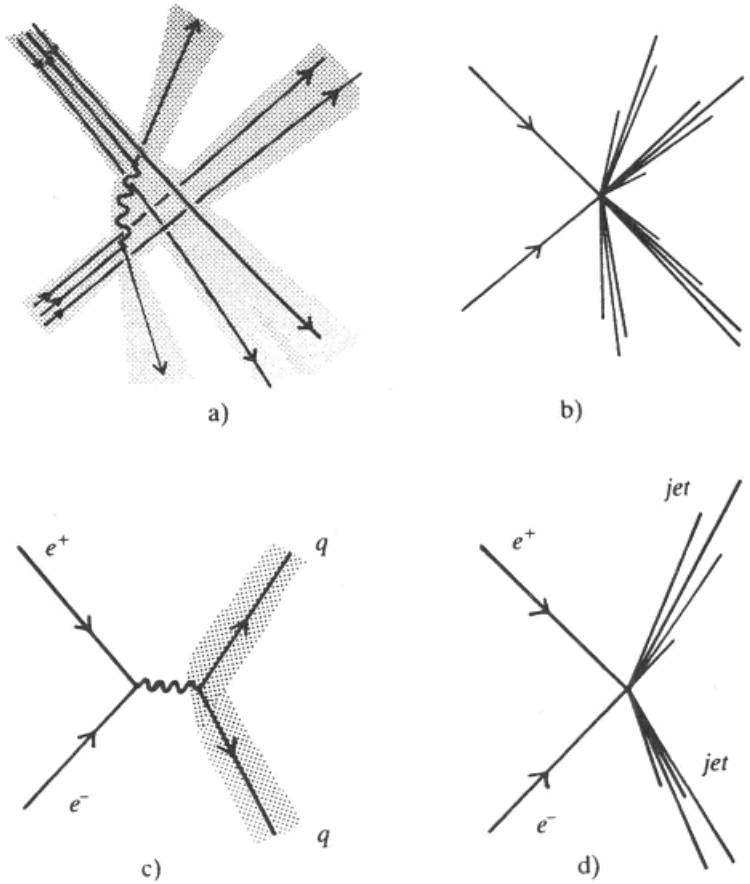
Ik ga nu even vooruitlopen op mijn verhaal. Als je deeltjes tegen elkaar aanschiet met energieën die *veel groter* zijn dan de massa's van de gewone kerndeeltjes (de hadronen), gedragen deze hadronen zich als een soort sponzige sneeuwballen waar de quarks als kleine harde pitjes in rondwentelen. Bij de meeste botsingen schieten die quarks gewoon langs elkaar heen en stuift de sneeuw uiteen. De doorgaande quarks bevatten de



Figuur 15. a) Twee protonen botsen tegen elkaar zonder dat de quarks elkaar direct treffen (een 'perifere' botsing). b) Wat de experimentator ziet.

1 Sinds de eerste druk van dit boek verscheen, is overigens de computercapaciteit enorm toegenomen, zodat bijvoorbeeld de massa's van de resonanties in detail kunnen worden uitgerekend en met de experimenteel gevonden waarden vergeleken. Er is nauwelijks meer twijfel aan de werking van het confinement-mechanisme.

meeste energie. Dit zijn de minder interessante botsingen (figuur 15).



Figuur 16. a) Twee quarks raken elkaar. b) Wat de experimentator dan ziet: een typische 'jet'. c) $e^+ + e^- \rightarrow$ 2 quarks. d) Zoals deze gebeurtenis er in het experiment uitziet.

Zo nu en dan echter botsen twee quarks tegen elkaar op. Deze vervolgen hun weg zijwaarts, waarbij ze andere quarks en gluonen meeslepen teneinde hun kleurlading te compenseren. Er ontstaan dan twee (of soms zelfs meer) compacte wolkjes hadronische deeltjes die de baan van de oorspronkelijke quarks blijven volgen. We noemen deze wolkjes *jets*. Wat de experimentator ziet is geschetst in figuur 16.

Ook in andere experimenten manifesteren de quarks en gluonen zich als ‘jets’. Bijvoorbeeld, als je een elektron tegen een positron aanschiet kunnen deze elkaar annihileren onder uitzending van een foton, dat dan weer een quark-antiquarkpaar produceert (figuur 16c). Deze geproduceerde quarks vormen dan weer wolkjes hadronen: een tweetal jets (figuur 16d). Er kan dan ook een derde of nog meer deeltjes geproduceerd worden, meestal gluonen. Ook deze manifesteren zich als jets. Kortom, de oorspronkelijke quarks en gluonen die bij een botsingsproces ontstonden verraden hun aanwezigheid vermomd als jets. Door deze jets nu zorgvuldig te meten, kunnen we de theorie direct toetsen. In het bijzonder zijn we nu in staat de interactiesterkte tussen quarks en gluonen te meten.

Iedere keer als er een nieuwe deeltjesversneller in gebruik werd genomen, bestreek deze weer een hoger energiegebied, en zo werden wij in staat gesteld de interactiesterkte tussen quarks te meten bij toenemende energie. We zien deze steeds verder afnemen, geheel in overeenstemming met ‘asymptotische vrijheid’.

14 De magnetische monopool

Het probleem van de permanente quarkopsluiting ging mij in 1973 en 1974 steeds meer boeien. Wat we wisten, was alleen dat de kleurkrachten die de naakte quarks op heel kleine afstand van elkaar uitoefenen relatief kleiner zijn dan de kleurkrachten tussen aangeklede quarks op grotere afstand. Dat was het effect van de ‘negatieve afscherming’ waarover ik het had in het vorige hoofdstuk. Extrapoleer je dit naar nog grotere afstand, dan lijkt het aannemelijk dat de kleurkrachten tussen quarks op grotere afstand van elkaar nog weer veel sterker worden. De krachten zouden gemakkelijk zo sterk kunnen worden dat ze de quarks permanent bij elkaar houden. Maar gebeurt dat nu ook? De essentiële moeilijkheid was hier dat juist omdat de krachten zo sterk zijn, berekeningen bijna onmogelijk werden. Het enige wat we goed kunnen, is rekenen aan deeltjes die bij benadering rechtuit gaan. Dat zullen de quarks zeer beslist niet doen als de krachten zo groot zijn. Dus de vraag werd: kun je nu nog een fundamentele reden aangeven waarom quarks altijd onzichtbaar blijven? Waarom vormen de veldlijnen van de kleurijktheorie worstjes zoals figuur 14, zonder uit te waaieren zoals ‘gewone’ elektrische en magnetische velden? Als je dit kunt verklaren, kun je misschien ook een rekenmethode vinden om alle eigenschappen van de hadronen te verklaren. Ik probeerde van alles om het antwoord te ontdekken.

Maar Holger Nielsen en Poul Oleson uit Kopenhagen, en onafhankelijk van hen Bruno Zumino van CERN, ontdekten iets waar ik helemaal niet aan had gedacht. Beschouw eens een stukje supergeleidend materiaal, zeiden ze. Probeer daar nu eens een *magnetische monopool* in te stoppen. Deze bestaan weliswaar niet, maar je kunt je deze in gedachten voorstellen, en dan uitrekenen wat de supergeleider dan zou doen. Een monopool is een hypothetisch deeltje dat, anders dan een ge-

wone magneet, wél een magnetische noordpool bezit maar niet de bijbehorende zuidpool (of juist andersom). Monopolen zijn nog nooit gevonden, maar daarover straks meer.

Ik had eerder uitgelegd dat een supergeleider geen enkel elektrisch of magnetisch veld tolereert: het schermt de velden volledig af. Maar dat *kan* hij niet met het magnetische veld van een monopool. Om een monopool toe te laten moet de supergeleider een gebiedje creëren waar het materiaal niet meer supergeleidend is, en daar mag het magnetische veld van de monopool dan doorheen lopen. Als je dit verder doorrekent vind je dat de veldlijnen tussen een magnetische noordpool en een magnetische zuidpool precies de worstvorm krijgen van figuur 14. Binnen het worstje is het materiaal niet meer supergeleidend. Omdat dit extra energie kost tracht het materiaal dit gebiedje zo klein mogelijk te houden, vandaar dat de veldlijnen niet uitwaaieren. (Zie ook figuur 14a.)

En zo kregen Nielsen, Olesen en Zumino een model voor quarks. Quarks zijn een soort magnetische monopolen, en onze ruimte is een soort supergeleider. Dit hadden we al eerder gezien: een Higgstheorie!

Jammer alleen dat je nooit staande kon houden dat quarks werkelijk magnetische monopolen zouden zijn. Volgens de quantumchromodynamica, waar ik inmiddels heilig in geloofde, hebben quarks echt niets dat op magnetische lading lijkt. En stel nou dat je die quantumchromodynamica even vergat en de theorie van magnetische monopolen ter hand nam. Er bestond nog geen enkele bruikbare theorie om hun bewegingen nauwkeurig te beschrijven, omdat magnetische monopoollading altijd heel *sterk* moest zijn. Als je die lading stopt in puntvormige deeltjes zoals de quarks dan zouden de krachten ertussen *altijd* groot moeten zijn, ook van dichtbij. In zo'n theorie kun je niets meer uitrekenen, en we raken dus van de wal in de sloot.

Maar het idee boeide me wel. Laten we eens kijken, dacht ik, wat er gebeurt als je dit voor een Yang-Millssysteem doet. En

toen deed zich een merkwaardige moeilijkheid voor. De fluxbuizen, zoals ik de worstjes ging noemen, werden instabiel. Maar hoe kon dat nou, want de magnetische veldlijnen van magnetische monopolen mochten alleen en uitsluitend uitkomen bij andere monopolen. Als er geen fluxbuis meer is, hoe lopen de veldlijnen dan? En toen leerde ik iets heel belangrijks van dit gedachte-experiment. De fluxbuizen vielen uit elkaar doordat in het model dat ik beschouwde zich spontaan nieuwe noord- en zuidmonopolen hadden gevormd. Maar niemand wist nog dat die konden ontstaan in zulke modellen!

Vergeet weer even het quarkopsluitingsprobleem. Het model dat ik aan het bekijken was had eigenlijk niets meer met de sterke kracht te maken. Ik was onbedoeld weer uitgekomen bij de zwakke-interactietheorie. Daarvan waren er in 1974 nog allerlei varianten in omloop. Ik kon afleiden dat in sommige van die modellen, met name één dat was bedacht door Glashow en een jongere medewerker van hem, Howard Georgi, magnetische monopolen konden ontstaan. Je kon ze als het ware construeren uit de bouwdoos van velden en deeltjes in zo'n theorie. In tegenstelling tot alle oudere ideeën over ‘puntvormige’ magnetische monopolen waren de monopolen die ik nu kon construeren heel ‘zachte’, ruimtelijk uitgestrekte objecten. Ik kon er allerlei eigenschappen van uitrekenen, inclusief de massa ervan. Dat dit alles nog niet eerder opgemerkt was kwam mede doordat de energie, ofwel massa, van deze nieuwe objecten veel groter is dan die van alle ‘gewone’ deeltjes. Dit was een interessante ontdekking, die ik in een grote conferentie over elementaire deeltjes in Londen uiteenzette. Daar bleek me toen dat de ontdekking onafhankelijk van mij ook in Moskou was gedaan door Alexander Polyakov, in een discussie met Lev Okun.

Nu was de principiële mogelijkheid van losse magnetische pooldeeltjes al in 1931 geopperd door Paul Dirac. Hij bewees op heel algemene gronden dat het *product* van de fundamentele elektrische lading van het elektron en de fundamentele mag-

netische lading van een eventuele magnetische monopool altijd een veelvoud moet zijn van de constante van Planck. Dat is een beetje vervelend als je een model van een magnetische monopool wilt construeren, want hier volgt uit dat de magnetische lading van een monopool zo sterk is dat je deze nooit storingstheoretisch kunt beschrijven. De magnetische eenheidslading blijkt dan namelijk 68,5 maal zo sterk te zijn als de elektrische eenheidslading (dat getal is precies de helft van het beroemde getal 137,036..., zie ‘de elektromagnetische kracht’, op pagina 36). Als quarks monopolen waren, zouden ze nooit asymptotisch vrij kunnen zijn!

Natuurlijk waren er allerlei onderzoekers geweest die niettemin toch geprobeerd hadden monopolen storingstheoretisch te behandelen, met zeer ontmoedigende resultaten. Maar mijn monopool was geen puntdeeltje maar een ‘hoopje veld’. Een storingstheoretische benadering die alleen maar goed zou zijn voor kleine magnetische ladingen had ik niet nodig en daarom werd mijn monopool[1] veel mooier. Wat zeer belangrijk was, was dat ik de massa ervan precies kon uitrekenen en dat was in alle vorige pogingen nooit mogelijk geweest. Als dit Georgi-Glashowmodel goed was dan zou de magnetische monopool ongeveer 8000 keer zo zwaar zijn als het waterstofatoom.

Benjamin Lee was zeer onder de indruk. Toen ik in Londen mijn werk met hem stond te bespreken, kwam er iemand langs die enigszins verbaasd aan mij vroeg: ‘Hé, heb jij nu ook al een model voor een magnetische monopool?’ Benjamin antwoordde daarop: ‘Hij heeft geen model, hij heeft er een gevónden!’ Ik mocht Benjamin erg graag. Het was een groot gemis voor de wereld van de deeltjesfysica toen hij een aantal jaren later, veel te jong, door een tragisch verkeersongeval van deze wereld werd weggenomen.

Bevatte het Georgi-Glashowmodel een monopool, het Wein-

1 Ik zeg wel ‘mijn’, maar hij is deels van Polyakov en Okun.

berg-Salammodel bevat er helaas geen. In dit model is er nog een technische obstructie die monopolen niet toestaat, tenzij je er verdere veranderingen in aanbrengt. En het Weinberg-Salammodel ging het winnen van het Georgi-Glashowmodel en andere modellen als je naar de experimentele resultaten keek. Als er magnetische monopolen bestaan, zullen ze niet de massa hebben zoals zou volgen uit het Georgi-Glashowmodel, zo'n 8000 maal de protonmassa, maar veel en veel zwaarder. Daarover straks meer.

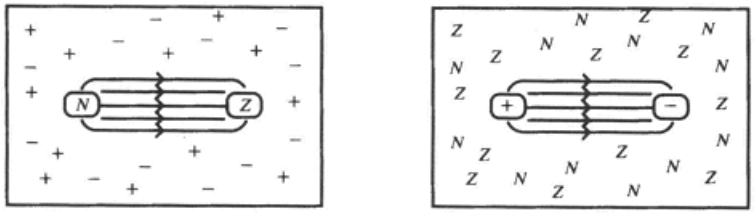
Deze theoretische ontwikkeling had in ieder geval tot gevolg dat experimentatoren met hernieuwde energie naar magnetische monopolen gingen zoeken, in water, in maangesteenten, en in oesters.[1] Er werden zeer gevoelige detectoren met supergeleidende spoeltjes gebouwd. Een enkele keer meende men een signaal opgevangen te hebben, maar wanneer je de opstelling verfijnde en de detectie-efficiëntie verbeterde, bleven de signalen steeds achterwege. Dit is een bekend verschijnsel bij experimenten, een teken dat het eerste signaal (dat ook door de experimentatoren zelf onbetrouwbaar was genoemd) op een onjuiste interpretatie berustte.

We weten nog steeds niet of magnetische monopolen bestaan, maar de ontdekking van de theoretische mogelijkheid zou belangrijk blijven, en wel om twee redenen. Zoals we later zullen zien, verwachten we dat het Weinberg-Salammodel slechts die deeltjes beschrijft die in onze tijd experimenteel bestudeerd kunnen worden. Maar er is een grens aan de energie die men in laboratoria aan een enkel deeltje geven kan. Bij energieën die veel en veel hoger zijn dan die grens, verwachten we nieuwe verschijnselen die slechts begrepen zullen kunnen worden als het Weinberg-Salammodel verder wordt uitgebreid. We weten nog niet hoe die verbeterde theorie eruit zal moeten zien, maar er is alle kans dat dan de ‘t Hooft-Polyakovmono-

1 Oesters staan erom bekend dat ze vreemde mineralen uit het zeewater filteren.

pool' tot de mogelijkheden gaat behoren. Het model dat ik in hoofdstuk 23 zal beschrijven, bevat echte, maar wel superzware magnetische monopolen.

'Wat mag, moet,' zeggen sommige theoretici. Iedere theoretisch denkbare constructie moet ook ergens in de natuur te vinden zijn. Dat is helaas niet altijd juist, maar het geldt wel voor monopolen. *Als* ze namelijk theoretisch mogelijk zijn, kun je ook uitrekenen hoeveel er werkelijk ontstaan zouden zijn in de allereerste beginfasen van het heelal. De resultaten van zulke berekeningen bezorgen hoofdbrekens bij die theoretici die het begin van de kosmos willen begrijpen. Al die monopolen zouden het aanzien van het heelal anders maken dan wat we nu zien. In feite leidt men uit deze kosmologische berekeningen beperkingen af omtrent de deeltjesmodellen die monopolen zouden toestaan.



Figuur 17. a) In een supergeleider bevinden zich positieve of negatieve ladingen die zich collectief in een laagste energietoestand bevinden ('Bose-Einsteincondensatie'). Het magnetische veld tussen een N-monopool en een Z-monopool wordt gedwongen de vorm van een worstje ('vortex') aan te nemen. b) In de quantumchromodynamica hebben we gecondenseerde kleurmonopolen die de hele ruimte vullen. Hierdoor wordt het kleur-elektrische veld tussen twee quarks in een worstvorm geperst.

En het tweede belang van monopolen is dat we nu gingen inzien dat in de quantumchromodynamica ook *kleurmagnetische*

monopolen kunnen voorkomen, en zelfs in grote hoeveelheden. Als je aanneemt dat deze kleurmonopolen weer een soort Bose-Einsteincondensatie ondergaan dan krijg je het begin van een échte verklaring van het verschijnsel quarkopsluiting in de quantumchromodynamica: we gebruiken inderdaad het oorspronkelijke idee van Nielsen en Olesen (figuur 17a), maar verwisselen alle elektrische ladingen met de magnetische. De quarks zijn kleur-elektrisch; het omringende vacuüm is een kleurmagnetische supergeleider! Zie figuur 17b.

Dit is moeilijke maar zeer boeiende materie. Met de kleurmagnetische monopool leek er weer een stukje van De Grote Legpuzzel gevonden te zijn. De Nielsen-Olesenvortex en de magnetische monopool zouden slechts het begin zijn van een serie bijzondere wiskundige verschijnselen in de Yang-Millstheorieën, waar wiskundigen en natuurkundigen ook nu nog niet op uitgekeken zijn.

15 Gypsy

In november 1974 werd de wereld van de deeltjesfysica opgeschrikt door een onverwachte ontdekking. Ik was juist in Parijs toen de geboorte werd bekendgemaakt van een nieuw deeltje. Een nieuw deeltje? zult u zeggen, en er waren er al zoveel, wat is daar nu nog voor bijzonders aan? Welnu, net bleek een deeltje te zijn dat in geen enkele serie thuishoorde. Twee groepen experimentatoren hadden het onafhankelijk van elkaar ontdekt.

Samuel Ting was leider van een experiment in Brookhaven, nabij New York, waar met grote energie protonen werden afgeschoten tegen een stilstaand trefplaatje gemaakt van zwaarder materiaal, en nu hadden hij en zijn medewerkers al maanden eerder een merkwaardig ‘signaal’ in hun apparatuur vastgesteld. Ting had er echter moeite mee dit signaal als een echt nieuw deeltje te identificeren, want als dat zo was, dan moest het iets buitengewoon bijzonders zijn. Hij ging checken en dubbel checken (inclusief de mogelijkheid dat iemand een practical joke met hem aan het uitvoeren was) en hij beval zijn medewerkers volledige geheimhouding.

Het nieuwe deeltje, dat hij *J* noemde, zou met buitengewone efficiëntie uiteenvallen in een elektron en een positron. Het waren deze twee deeltjes die Ting steeds in paren aantrof, en wel zodanig dat ze afkomstig moesten zijn van een nieuw soort brokje materie met een massa van 3100 MeV (ruim driemaal de protonmassa). De wetten van de deeltjesfysica zeggen dat je dat object dan ook moet kunnen maken als je elektronen en positronen met ieder een bewegingskracht van 1550 MeV tegen elkaar laat botsen. Nabij Stanford, Californië, bevindt zich een laboratorium genaamd SLAC (‘Stanford Linear Accelerator Center’). In een nieuwe versneller, SPEAR, werden elektronen tegen positronen aangeschoten. Toen Ting vernam dat de

SPEAR machine stond afgesteld op het gebied rond 1500 MeV per deeltje, moest hij zijn resultaat wel wereldkundig maken, maar toen was het te laat: ineens gingen de tellers in SLAC wild tekeer!

Als je het elektron en het positron ieder 1540 MeV geeft, of ieder 1560 MeV, dan doen ze of ze elkaar niet zien. De bundels elektronen en positronen gaan bijna ongestoord dwars door elkaar heen. De experimentatoren waren eraan gewend geraakt hun apparatuur af te stemmen op botsingen die slechts ongeveer eens per minuut plaatsvonden. Maar stelde men de machine af op 1550 MeV per deeltje dan produceerden ze ineens nieuwe deeltjes, en wel ongeveer één per seconde. Deze vielen onmiddellijk weer uit elkaar en leverden dan signalen af in de detectie-apparatuur. Voor de leider van dit experiment, Burton Richter, was het snel duidelijk dat zo'n gigantische toename van het aantal botsingen niet aan een fout in de apparatuur kon liggen. Hij maakte de ontdekking van een nieuw deeltje bekend, dat hij ψ (psi) noemde (naar de eerste twee letters van SPEAR). Het wilde tikken van de detectoren werd versterkt op de intercom van het laboratorium doorgegeven, zodat alle medewerkers konden meegenieten van de nieuwe ontdekking. Pas daarna hoorde men van Tings resultaten. Er was niet veel voor nodig om de heren ervan te overtuigen dat ze beiden dezelfde ontdekking hadden gedaan.

Wat het *J*/ψ (in de wandelgangen 'gypsy') zo merkwaardig maakt, is dat het nergens in de bestaande tabellen leek thuis te horen. Het kon op heel veel verschillende manieren uiteenvallen: $e^+ + e^-$, $\mu^+ + \mu^-$, 5π, 7π, 9π, $2\pi+2K$, en, hoewel minder vaak, in andere aantallen pionen, kaonen, en baryon-antibaryonparen. Soms kwam er ook nog een foton tevoorschijn. In Parijs kwam één van de leden van het SLAC-team in een overvolle zaal vertellen wat men te weten was gekomen omtrent het nieuwe deeltje. Hij eindigde met een opsomming van de theoretische mogelijkheden voor een verklaring van de waarnemingen en

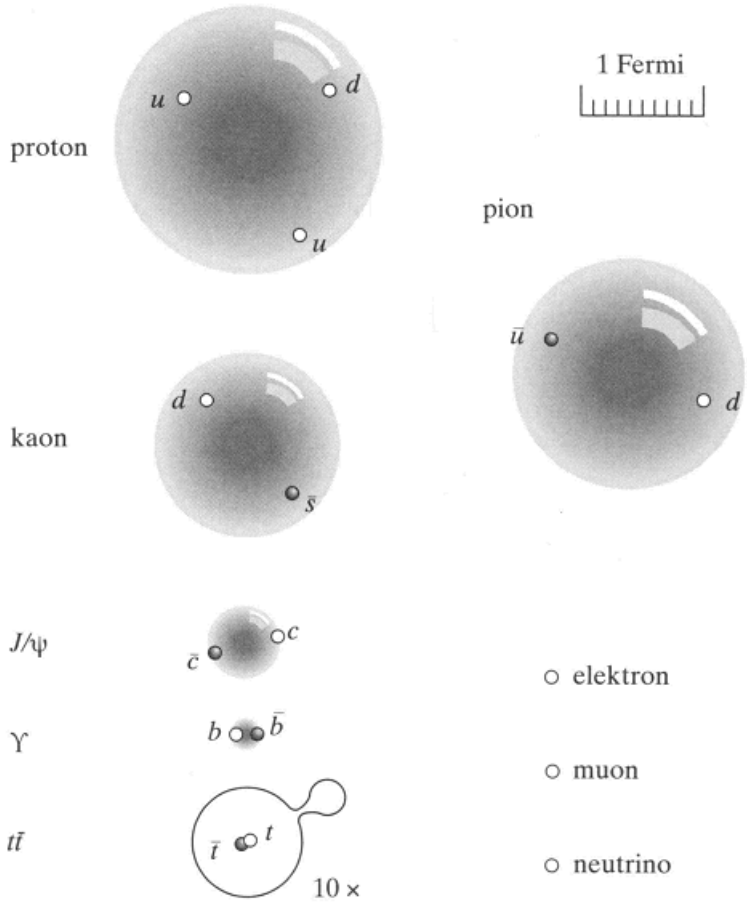
hoe men het deeltje zou kunnen identificeren.

Was het een meson? Maar daarvoor was zijn gemiddelde levensduur (10^{-20} seconde) veel te lang. Is er een behoudswet die al deze mogelijke vervalswijzen tegenhoudt? Maar dan is de kracht die het verval wél mogelijk maakt veel sterker dan de zwakke kracht. Was het nieuwe deeltje soms een nieuw soort foton? Hier viel wat voor te zeggen. Het leek waarschijnlijk dat de spin 1 was, net als bij het foton. Was dit misschien één van de Yang-Millsfotonen van de zwakke kracht? Maar daarvoor was de massa veel te klein. Was het misschien de drager van de kleurkracht? Als dat zo was dan klopte er niets van wat ik dacht te weten van de quantumchromodynamica.

Een van de mogelijkheden die werden geopperd was dat *J*/ψ een gebonden toestand was van de gezochte *charm*quark *c* en zijn eigen antideeltje $\bar{c}$. Er ging mij een lichtje op. 'Hé, dat is een aardige mogelijkheid,' zei ik tegen de collega die naast me zat, 'wat is daar dan fout aan?' Maar zijn antwoord was wat ook de andere aanwezige theoretici zeiden: 'Nah, dan zou het een gewoon meson zijn, en daarvoor is zijn levensduur véél te lang!' *c* en $\bar{c}$ kunnen elkaar annihileren via de sterke kracht; waarom zouden ze daar dan zo lang over doen?

Nog vóór we van de schrik hersteld waren, werd er gemeld dat er nog meer van dit soort deeltjes waren. ψ′ heeft een massa van bijna 3700 MeV, en ψ″ is 3770 MeV, maar deze laatste was veel instabieler, zoals een echte resonantie betaamt. Hadden we hier nog meer kleurbosonen te pakken of was dit het begin van een reeks van een heel nieuw soort resonanties?

Nu iets meer over dat lichtje dat bij me opging. Ik kan er niet echt aanspraak op maken, want de bevestiging dat *J*/ψ inderdaad een $c\bar{c}$-meson is, kwam van verdere zorgvuldige experimenten en theoretische analyses gedaan door diverse theoretici die nauwer dan ik bij het experiment betrokken waren. De reden waarom *J*/ψ zo merkwaardig stabiel is, is asymptotische vrijheid. Want wat is er aan de hand?



Figuur 18. De grootte van de deeltjes.

De *c*-quark is veel zwaarder dan de eerder besproken quarks *u, d* en *s*. In een gebonden toestand van *c* en $\bar{c}$ bewegen beide quarks veel minder heftig dan de 'normale' quarks zouden doen. Daardoor zitten ze veel dichter bij elkaar, en het $c\bar{c}$-meson is daarom veel kleiner dan de gewone mesonen. En nu herinnert u zich misschien dat de sterke kracht minder sterk wordt wanneer deze een kleinere afstand moet overbruggen. Dat kwam door die negatieve afscherming van de kleurlading (hoofdstuk 13). Dat betekent dat alle interacties binnen het $c\bar{c}$-systeem ongewoon langzaam verlopen, zodat dit meson ongewoon lang leeft in vergelijking met zijn soortgenoten $s\bar{s}$ (de phiresonantie) en $u\bar{u}$en $d\bar{d}$ (rho en omega).

Maar daarbij kwam dat voor het $c\bar{c}$-systeem (dat we 'charmonium' gingen noemen) de sterke kracht zo zwak is dat je de berekeningen daarvoor veel nauwkeuriger kon doen dan we bij de sterke kracht gewend zijn! Het charmoniumsysteem was dus het eerste systeem waarop je direct enigszins betrouwbare berekeningen van de quantumchromodynamica kunt toepassen. In feite moet de berekening van de levensduur hiervan als twee druppels water lijken op de berekening van de levensduur van positronium. Positronium is de gebonden toestand van een *elektron* en een *positron*, dat uiteen kan vallen in fotonen, via de elektromagnetische kracht. Om de levensduur van charmonium uit te rekenen hoefde je alleen maar de berekening van positronium te nemen en daarin de sterkte van de elektrische lading te vervangen door de koppelingsconstante van de sterke kracht.

De berekening zelf is ingewikkeld; die doe je niet zomaar even. Toen ik weer thuis was, zocht ik hem dus gauw op in de boeken. Daar bleek iets waar ik nog niet eens aan gedacht had. Als je de gebonden toestand met spin 1 neemt, dan kan deze niet in twee fotonen uiteenvallen maar moeten het ten minste drie fotonen zijn. Dat betekende dat de vervalswaarschijnlijkheid in ieder geval als evenredigheidsfactor de *zesde* macht van

de sterke koppelingsconstante moest bevatten. De interactiesterkte van de sterke kracht voor het $c\bar{c}$-systeem hoefde maar een beetje kleiner te zijn dan bij $s\bar{s}$ of $u\bar{u}$ om de lange levensduur van *J*/ψ te verklaren!

Het *J*/ψ deeltje vervalt doordat de twee gecharmeerde quarks eerst elkaar annihileren door drie *gluonen* te maken. Deze drie gluonen creëren daarna de pionen, kaonen en wat dies meer zij, maar omdat de eerste reactie maar moeizaam gaat, bepaalt deze de totale levensduur. Na invullen van de getallen bleek deze verklaring heel aardig te kloppen. Het duurde niet lang voordat men deze verklaring alom ging accepteren.

De charmante quark moet ook in z'n eentje kunnen voorkomen in hadronen, naast gewone quarks. Met name moesten er mesonen zijn van het type $c\bar{u}$, $\bar{s}c$, enzovoorts, en baryonen opgebouwd uit *udc, usc*, en andere combinaties. Omtrent het bestaan van zulke hadronen had men inmiddels al enige signalen gezien in de vorm van registraties van ongewone botsingsprocessen. Maar veel details had men nog niet.

Nu de eigenschappen van de *c*-quark veel nauwkeuriger konden worden bepaald, wisten de experimentatoren ook hoe ze nog meer van zulke deeltjes konden vinden. Als je de massa van deze deeltjes berekende, leek het waarschijnlijk dat het zwaardere ψ direct in gecharmeerde mesonen zou kunnen uiteenvallen. Omdat daarvoor de twee charmquarks elkaar niet eerst hoeven te annihileren gebeurt dit verval veel sneller dan het verval van *J*/ψ zelf. Vandaar dat ψ veel instabieler is. Maar vandaar ook dat het ψ de aangewezen plaats is om naar de nieuwe gecharmeerde mesonen te gaan zoeken, en ze werden korte tijd later inderdaad ontdekt.

Was het *J*/ψ, net als het muon, door niemand besteld? Achteraf gezien waren er wel degelijk ideeën geweest om te trachten $c\bar{c}$ deeltjes te detecteren, maar de consequenties van het asymptotisch vrij zijn van de sterke kleurkracht waren onderschat. Men had gedacht dat ze veel meer zouden lijken op de

resonanties ϱ (rho) en φ (phi), die uit een gewone quark en een antiquark bestaan, ook in de spin-1-toestand. Nu kunnen we ons wel voor ons hoofd slaan.

J/ψ was een puzzelstukje dat in één keer diverse losliggende gedeeltes van onze Grote Legpuzzel aan elkaar deed passen. Aan de ene kant was nu de ontbrekende charmquark, nodig om de zwakke kracht kloppend te krijgen via het GIM-mechanisme, ten tonele verschenen; en aan de andere kant bleek de quantumchromodynamica, met haar asymptotische vrijheid, zich zo goed volgens de theoretische regels te gedragen dat we ons er toch nog door hadden laten verrassen! Quantumchromodynamica was méér dan zomaar een rekenmodel: de details waar we eerst maar nauwelijks echt geloof aan hadden gehecht, klopten óók.

Veltman was, zoals hem eigen is, sceptisch. Als je een theorie hebt, moet je een voorspelling kunnen doen, zei hij, en niet achteraf zeggen dat het klopt. Ik was bereid een voorspelling te doen. Doordat de krachten zwakker zijn, bewegen de quarks in *J*/ψ zich veel langzamer dan de lichtsnelheid. Daardoor zijn de effecten van de *spin* van de quarks relatief onbelangrijk. In *J*/ψ draaien de quarks beide dezelfde kant op, zodat deze combinatie spin 1 heeft. Maar ze zouden ook in tegengestelde richting kunnen draaien, waardoor de combinatie spin 0 zou hebben. Dat zou dan een nieuw deeltje opleveren, dat moeilijker experimenteel te detecteren was dan *J*/ψ maar dat men weldra ook zou kunnen bestuderen. De energie van dit nieuwe deeltje zal maar weinig verschillen van die van *J*/ψ. Bij de gewone quarks zijn deze energieverschillen relatief groot. Het nog te ontdekken spin-0-deeltje zou volgens mij maar weinig lichter moeten zijn dan *J*/ψ. Ik verwachtte dat de massa tussen de 3000 en 3100 MeV zou zijn.

Het werd een weddenschap, en ik verloor hem. De massa van het nieuwe spin-0-deeltje, dat η_c (‘èta-c’) zou gaan heten, bleek ‘slechts’ 2980 MeV, net beneden de grens van de weddenschap.

+

Tabel 6. Enkele van de nieuwe deeltjes.[1]

deeltje	*quarks*	*massa*	*spin*	*levensduur*	*waargenomen vervalswijzen*
J/ψ	$c\bar{c}$	3096,9	1	$7,5 \times 10^{-21}$	e^+e^-; $\mu^+\mu^-$; 3π; 5π; 7π; $7\pi + 2K$; $p\bar{p}\pi^+\pi^-$; etc.
ψ'	$c\bar{c}$	3686	1	$2,4 \times 10^{-21}$	$J/\psi + 2\pi$; $e^+ + e^-$; $\mu^+ + \mu^-$; 5π; etc.
ψ''	$c\bar{c}$	3770	1	$2,8 \times 10^{-23}$	D^+D^-; $D^0 + \overline{D}^0$; $e^+ + e^-$; etc.
η_c	$c\bar{c}$	2980	0	$5,0 \times 10^{-23}$	$\eta + 2\pi$; 4π; $2K + \pi$; $2K + 2\pi$; $4K$, $p + \bar{p}$
χ	$c\bar{c}$	3415	0	5×10^{-23}	4π; $2K + 2\pi$; 6π; 2π; $J/\psi + \gamma$; $2K$
χ'	$c\bar{c}$	3510	1	$7,5 \times 10^{-22}$	$J/\psi + \gamma$; 6π; 4π; etc.
χ''	$c\bar{c}$	3556	2	3×10^{-22}	$J/\psi + \gamma$; etc.
Υ	$b\bar{b}$	9460	1	$1,2 \times 10^{-20}$	$\mu^+ + \mu^-$; $e^+ + e^-$; $\tau^+ + \tau^-$; hadronen.
Υ'	$b\bar{b}$	10023	1	$1,5 \times 10^{-20}$	$\Upsilon + 2\pi$; $\mu^+ + \mu^-$; $e^+ + e^-$; $\tau^+ + \tau^-$; hadronen.
Υ''	$b\bar{b}$	10355	1	$2,5 \times 10^{-20}$	$\Upsilon + 2\pi$; $\Upsilon' + 2\pi$; $\mu^+\mu^-$; e^+e^-; $\tau^+\tau^-$; hadronen.
D^+	$c\bar{d}$	1869	0	$1,06 \times 10^{-12}$	$K^- + 2\pi^+$; $K^- + 3\pi$; $\overline{K}^0 + \pi^+$; $\overline{K}^0 + 2\pi$
D^-	$d\bar{c}$	1869	0	$1,06 \times 10^{-12}$	$K^+ + 2\pi^-$; $K^+ + 3\pi$; $K^0 + \pi^+$; $K^0 + 2\pi$
D^0	$c\bar{u}$	1864	0	$4,1 \times 10^{-13}$	$K^- + \pi^+$; $\overline{K}^0 + \pi^0$; $K + 2\pi$; $K + 3\pi$; 2π; $2K$; etc.
$\overline{D}^0$	$u\bar{c}$	1864	0	$4,1 \times 10^{-13}$	$K^+ + \pi^-$; $K^0 + \pi^0$; $K + 2\pi$; $K + 3\pi$; 2π; $2K$; etc.
D_s^+	$c\bar{s}$	1969	0	$4,9 \times 10^{-13}$	$2K$; $2K + \pi$; 3π; 5π; etc.
D_s^-	$s\bar{c}$	1969	0	$4,9 \times 10^{-13}$	$2K$; $2K + \pi$; 3π; 5π; etc.
B^+	$u\bar{b}$	5279	0	$1,65 \times 10^{-12}$	$\overline{D}^0$+ pionen; $e^+ + \nu_e$+ pionen; e.a.
B^-	$b\bar{u}$	5279	0	$1,65 \times 10^{-12}$	D^0+ pionen; $e^- + \overline{\nu}_e$+ pionen; e.a.
B^0	$d\bar{b}$	5279	0	$1,5 \times 10^{-12}$	$D^- + e^+ + \nu_e$; $D^- + \pi^+$; e.a.
$\overline{B}^0$	$b\bar{d}$	5279	0	$1,5 \times 10^{-12}$	$D^+ + e^- + \overline{\nu}_e$; $D^+ + \pi^-$; e.a.
B_s^0	$s\bar{b}$	5370	0	$1,5 \times 10^{-12}$	D_s^-+ pionen; e.a.
Λ_c^+	cdu	2285	$\frac{1}{2}$	2×10^{-13}	$p + K^- + \pi^+$; $p + \overline{K}^0$; $\Lambda + \pi^+$; e.a.
Ξ_c^+	csu	2466	$\frac{1}{2}$	3×10^{-13}	$\Sigma^+ + K^- + \pi^+$; $\Lambda + K^- + 2\pi^+$; e.a.
Ξ_c^0	csd	2472	$\frac{1}{2}$	10^{-13}	$\Lambda + \overline{K}^0$; $\Lambda + \overline{K}^0 + 2\pi$; $\Xi^- + \pi^+$; e.a.
Λ_b^0	bdu	5624	$\frac{1}{2}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$\Lambda_c^+ + e^- + \overline{\nu}_e$+ pionen; e.a.
Ω_c^0	ssc	2704	$\frac{1}{2}$	6×10^{-14}	$\Sigma^+ + 2K^- + \pi^+$; $\Xi^- + K^- + 2\pi^+$; $\Omega^- + \pi^+$; $\Omega^- + 3\pi$

[1] Getallen naar de gegevens van 2002.

1 Getallen naar de gegevens van 2002.

De reden waarom η_c later ontdekt is dan J/ψ, is dat het niet in een elektron-positronpaar uiteen kan vallen en ook niet uit een elektron-positronbotsing kan ontstaan. Dit is omdat $e^+ + e^-$ alleen in $c\bar{c}$ kunnen overgaan door eerst een foton te vormen, dat spin 1 heeft. Wel kan J/ψ uiteenvallen in een η_c en een foton, maar dit verval is zeldzaam. Het η_c is lichter dan ik gedacht had omdat de sterke kracht hier toch al zo sterk is dat de afwijkingen ten opzichte van positronium al vrij aanzienlijk zijn. De weddenschap was wat al te impulsief geweest.

Door de oudere generatie van natuurkundigen wordt nog wel gesproken van ‘de glorieuze dagen van de natuurkunde’. Bedoeld wordt dan het tijdperk van de grote ontdekkingen in de eerste helft van de twintigste eeuw: de quantummechanica, de algemene relativiteit, de quantumelektrodynamica en de ontdekkingen van de eerste elementaire deeltjes.

Maar wat mij betreft vielen de ‘glorieuze dagen’ tussen 1970 en 1976, toen ineens zo veel stukjes van de legpuzzel voor de zwakke, de elektromagnetische, en de sterke kracht op hun plaats vielen. De ontdekking van J/ψ in 1974 was het absolute hoogtepunt. Vóór die ontdekking was er nog twijfel of we het met de zwakke-krachttheorie wel bij het goede eind hadden, en zagen we onze theorie voor de sterke kracht als een idealisatie van iets dat misschien veel gecompliceerder en ondoorgrondelijker was. Nu echter wisten we dat van beide theorieën ook de details klopten. Naarmate men verderging met experimenteren en meten groeide onze verbazing hierover. Die details klopten namelijk veel beter dan velen van ons ooit gehoopt hadden. Eén ding werd wel heel duidelijk: we wonen in een wereld die heel nauw luistert naar de wetten van de wiskunde. Die wiskunde is moeilijk maar kan helemaal begrepen worden.

Dit is toch wel iets om even stil bij te staan. Hoe komt het nu dat onze menselijke hersenen in staat zijn de wiskunde van die voor ons zo vreemde wereld van exotische subatomaire deeltjes helemaal te begrijpen? Waren die hersenen van ons niet

geëvolueerd, volgens Darwin, door natuurlijke selectie: wie de beste pijl en boog kan maken, mag die gave op zijn nageslacht overbrengen? En wat hebben elementaire deeltjes nu nog gemeen met een pijl en boog? Het enige antwoord dat ik hierop kan verzinnen is: logica is logica, en die geldt net zo goed voor pijlen en bogen als voor elementaire deeltjes.

Het meten van de levensduur van de nieuwe hadronen met charme erin was een nieuwe uitdaging aan het adres van de experimentatoren. Vele van die deeltjes blijven slechts zo'n 10^{-12} seconden leven, en dientengevolge leggen ze gedurende hun hele leven slechts een fractie van een millimeter af. Hier wordt het werken met dradenkamers of bellensporen moeilijk. Maar de experimentatoren staan voor niets. Door zorgvuldig en vooral veel te meten (zo nu en dan leeft een deeltje wat langer) vindt men toch nog de gemiddelde lengte van een spoor. Ook leidt men de deeltjes soms rechtstreeks door een fotografische emulsie, die dan onder een microscoop kan worden geanalyseerd.

16 Het standaardmodel

Met de deeltjes die we nu hadden, waren de details van de zwakke, de elektromagnetische en de sterke kracht al heel aardig in kaart gebracht. Nog één ding was niet geheel in orde: gemiddeld drie van de duizend K_{lang}-mesonen vervallen in twee pionen en schenden daarmee het behoud van *PC*-symmetrie, zoals ik beschreef in hoofdstuk 7. Welke kracht is hiervoor verantwoordelijk?

Wat dit probleem zo moeilijk maakt, is dat het K_{lang} het *enige* deeltje is, waarvoor men dit verschijnsel duidelijk kon vaststellen (pas rond 2001 werden de eerste *PC*-schendingsverschijnselen gemeten bij de B-deeltjes en hun antideeltjes). Er zijn verschillende manieren bedacht om *PC*-schending in te voeren in de beschrijving van de deeltjes die we nu hebben. In ieder geval zijn er nog meer 'hulpdeeltjes' nodig om deze kracht over te brengen.

Het blijkt *niet* te kunnen gaan met een nieuw Yang-Millsijkveld. De spin-1-deeltjes houden altijd *PC*-symmetrie intact (misschien is dat wel de reden waarom de inbreuk op *PC*-symmetrie zo zeldaam is?).

Men zou kunnen denken aan effecten afkomstig van nieuwe deeltjes met spin 0, die bij voorkeur ook weer één of andere vorm van Bose-Einsteincondensatie ondergaan. Zo kan het, maar de modellen die je zo krijgt werden niet erg populair. We willen deeltjes met spin 0 zoveel mogelijk vermijden omdat ze zo veel willekeurige interactieparameters met zich meebrengen. Modellen met zulke deeltjes zien er gekunsteld uit. Op zich is dat niet voldoende om deze mogelijkheid uit te sluiten, maar het geval wil dat er nog een andere, elegantere mogelijkheid was.

U herinnert zich dat Glashow, Iliopoulos en Maiani de *charm*-quark invoerden om de symmetriestructuur van de zwakke kracht beter te kunnen begrijpen. Welnu, zo stelde

men, we doen dit nog eens. We voeren ditmaal twee nieuwe quarks in. De eerste vier quarks waren in paren gekomen met elektrische lading +⅔ en -⅓, namelijk het paar *u* en *d*, en het paar *c* en *s*. Het nieuwe paar moest er net zo uitzien, maar de nieuwe quarks mochten gerust aanzienlijk zwaarder zijn dan de reeds bekende. Ze kregen al namen. Omdat ze analoog zijn aan ‘up’ en ‘down’ gingen ze respectievelijk ‘top’ (*t*) en ‘bottom’ (*b*) heten. Men gebruikt ook wel de meer poëtische namen ‘truth’ en ‘beauty’.

Dat er één spin-0-deeltje moet zijn om via het Higgsmechanisme aan de zwakke kracht de gedaante te geven die we kennen is onvermijdelijk. Dit ene Higgsdeeltje nu koppelt aan alle quarks en leptonen om die hun massa te geven. Maar datzelfde Higgsdeeltje kan ook overgangen veroorzaken tussen de verschillende quarks. Als er geen zwakke kracht was geweest zouden de quarks nog steeds in allerlei stabiele toestanden blijven zitten. Het is nu een *samenspannen* van de zwakke kracht en deze Higgskracht dat de vele vervalswijzen van de hadronen mogelijk maakt.

Hoe meer fermionen we invoeren, hoe meer soorten wisselwerkingen het Higgsdeeltje met de quarks mag hebben. De Japanners Kobayashi en Maskawa schreven de meest algemene uitdrukking op voor de krachten die je dan krijgt, en het bleek dat één van de termen in hun vergelijkingen niet *PC*-symmetrisch is. Maar zo'n term krijg je pas als er minimaal zes quarksoorten zijn. Dit is waarom men ging zoeken naar deeltjes met nog een nieuwe quarksoort erin. En ze werden gevonden. In tabel 6 ziet u de deeltjes die de nieuwe beautyquark bevatten. Het eerst werd het Y (‘upsilon’) ontdekt, dat uit *b* en $\bar{b}$ moest bestaan. Zijn massa is maar liefst 9460 MeV. Hadronen met slechts één *b*-quark erin wegen ruim 5000 MeV. Kennelijk kost zo'n beautyquark ongeveer 5000 MeV. En het topquark? Met bottom (of ‘beauty’), maar zonder top (of ‘truth’) zou het standaardmodel beslist niet goed werken, en daarom werd er naar-

stig naar het topquark gezocht. Pas in 1994 werd het bestaan ervan aangetoond, maar daarover straks meer.

Nog zou er een vuiltje zitten in de theorie die je dan krijgt. Dit is iets wat op het eerste gezicht op een louter technisch, wiskundig probleempje lijkt, en het zou je verbazen als de Natuur zich daaraan zou storen. Feit is dat de renormeringsprocedure niet helemaal goed werkt als er zes quarksoorten zijn en slechts vier leptonsoorten. We noemen dit een *anomalie*. Er gaat iets mis met de renormeringsprocedure doordat een paar termen niet tegen elkaar wegvallen. Wat precies de natuurkundige reden van deze anomalie is zullen we later pas begrijpen.

Reparatie was gelukkig eenvoudig. Wat je nodig hebt is nog een leptonpaar. We hadden al het elektron *e* met zijn neutrino ν_e, en het muon μ met diens neutrino ν_μ. De derde leptonfamilie, dat wil zeggen een muonachtig deeltje (maar dan veel zwaarder) met bijbehorend neutrino zou de anomalie volledig neutraliseren.

Een experimentator in CERN, Antonino Zichichi, had reeds in 1967 een voorstel ingediend om naar een nieuw, ‘zwaar lepton’ te gaan zoeken. De moeilijkheid bij het waarnemen van zo'n nieuw lepton was zijn korte levensduur, gecombineerd met het feit dat het altijd uiteenvalt door één of meer neutrino's uit te zenden, en deze zijn niet waarneembaar. Het signaal van een uiteenvallend nieuw lepton zou daarom moeilijk te herkennen zijn. Zichichi bedacht hoe deze obstakels overwonnen konden worden. De leptonen zouden paarsgewijs moeten worden geproduceerd. Als er dan één van in een elektron en neutrino's uiteenvalt, en het andere in een muon met neutrino's, dan heb je een heel karakteristiek signaal, een vingerafdruk van de gezochte leptonen, die moeilijk aan iets anders toe te schrijven zou zijn. Maar Antonino had een ander probleem: het overtuigen van zijn collega's dat het zoeken naar zulke verschijnselen zinvol zou zijn. Het werd hem niet gegund te blijven speuren bij voldoende hoge energie, en daarom kon hij alleen vaststellen

dat er beneden ongeveer 1000 MeV geen nieuw ‘zwaar lepton’ bestaat.

Martin Perl (Nobelprijs 1995) had rond 1975 meer geluk. Later vertelde hij waarom hij dacht dat er nog meer leptonen moesten zijn; zijn gedachtegang had niets met de eerder beschreven theorie van doen. De sterk reagerende deeltjes komen in oneindige reeksen voor, protonen, neutronen en al hun aangeslagen toestanden (de resonanties). Waarom zouden er dan maar twee geladen leptonsoorten (het elektron en het muon) zijn? Perl verwachtte dat er misschien wel net zo veel leptonen zijn als hadronen; ze zijn gewoon wat moeilijker te detecteren. Toen hij wel signalen opving, kostte het hem heel wat moeite zijn collega's ervan te overtuigen dat hij inderdaad een nieuw lepton had gedetecteerd. Zelf was ik ook eerst sceptisch, maar de metingen zijn nu zo nauwkeurig dat het allemaal wel echt waar moet zijn. Het nieuwe lepton, tau (τ) genaamd, weegt 1777 MeV. Het τ valt uiteen in $e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$, $\mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$, $\pi^- + \nu_\tau$ of in andere hadronen, altijd met een ν_τ erbij. U begrijpt dat Perl doorging met zoeken naar volgende leptonen. Dat kon niet meer stuk, dacht hij, maar tot zijn verbazing lijkt de serie althans voorlopig op te houden.

Dat de zwakke kracht correct wordt omschreven door het originele model zoals Weinberg dat in 1964 had opgeschreven, leed nu eigenlijk geen twijfel meer. De metingen aan de neutrale stroom waren nu ook zo nauwkeurig geworden dat men een heel precieze voorspelling kon doen omtrent de dragers van de zwakke kracht, de geladen zwakke vectorbosonen W^+ en W^-, en de neutrale component, die Weinberg Z^o had genoemd, en ook zo ging heten. W^+ en W^- moesten ruim 80.000 MeV zijn en Z^o ruim 90.000 MeV.

Reeds tijdens de zomerschool van 1970 werd er verteld dat een Nederlandse ingenieur een slimme manier had bedacht om in een versneller een zeer nauwe bundel antiprotonen te produceren. Antiprotonen maak je door protonen tegen zwaarde-

re atomen aan te schieten; dan ontstaan er (naast een heleboel andere deeltjes) antiprotonen, die echter in alle richtingen wegschieten. Door deze antiprotonen een spanningsverschil te laten doorlopen, krijg je weliswaar voor elkaar dat ze enigszins in het gareel gaan lopen, maar de bundel blijft zeer diffuus. Wat men graag zou willen is een bundel antiprotonen tegen een bundel protonen uit tegenovergestelde richting laten botsen, maar daartoe moeten beide bundels heel goed gefocusseerd zijn. Hoe krijg je een bundel antiprotonen die niet netjes in de maat lopen gefocusseerd? Dit was het probleem waar Simon van der Meer een oplossing op vond. Stel dat je een klas ongedisciplineerde schoolkinderen hebt. Ze doen allemaal wat anders stouts. Er is maar één juffrouw die alleen maar tegen de hele klas kan schreeuwen. Steeds gehoorzamen er maar een paar. Sommigen reageren juist averechts op een commando. Door iedere keer zorgvuldig haar woorden te kiezen krijgt ze langzaam maar zeker de klas onder controle.

Vervang nu de schoolkinderen door antiprotonen. De ogen en oren van de juffrouw zijn de gevoelige elektroden die de gemiddelde positie van de bundel antiprotonen zeer snel registreren. Het commando wordt gegeven door een snel te variëren elektrisch of magnetisch veld. Het resultaat is dat de protonen een steeds idealere baan gaan volgen. Dit proces noemde Van der Meer ‘stochastisch koelen’. Na zorgvuldige proefnemingen in CERN bleek dat de methode goed werkt. De Super-protonversneller, genaamd SpS, werd omgebouwd tot S$\bar{p}$pS (Super antiproton-proton-Synchroton). In twee praktisch cirkelvormige buizen werden bundels protonen en antiprotonen gestuurd die met grote energie tegen elkaar botsten. De energie was groot genoeg om onze hypothetische *W*- en *Z*-bosonen te maken. Het wekte nauwelijks nog verbazing toen deze machine, kort na het bereiken van de vereiste energie, inderdaad signalen produceerde die volledig overeenkwamen met de voorspelde vingerafdrukken van zowel *W* als *Z*.

Vervolgens werd er een nog grotere machine gebouwd, LEP ('Large Elektron-positron Collider'). Hiervoor was een tunnel nodig van maar liefst 27 kilometer omtrek. Het versnellen van elektronen en positronen tot hoge energieën is namelijk vanwege hun kleine rustmassa technisch veel moeilijker dan het versnellen van protonen en antiprotonen (er komt veel meer straling vrij). Het grote voordeel van elektron-positronbotsingen is echter dat zowel het elektron als het positron puntvormig zijn. Dat betekent dat ze in een botsing tezamen één enkel Z^o-boson kunnen maken, zonder dat er nog meer deeltjes vrijkomen. Geven we het elektron en het positron elk iets meer dan 45.000 MeV energie mee, dan worden er *grote hoeveelheden* Z^o-deeltjes gemaakt, en de gevoelige energieafhankelijkheid van dit proces stelt de experimentator in staat zeer gedetailleerde metingen te doen. Ingenieurs en fysici ontdekten dat de energie van de deeltjes in de bundels uiterst nauwkeurig gemeten kon worden. Een precisie-instrument van 27 kilometer kan dan voor verrassingen zorgen! Eerst stelde men vast dat op regenachtige dagen de bundel anders loopt dan wanneer het droog is. Dat kon gemakkelijk verklaard worden door aan te nemen dat het gesteente waardoor de tunnel loopt kan uitzetten of inkrimpen al naar gelang de hoogte van het grondwaterniveau.

Toen merkte men een maandelijkse schommeling op. Waar werd die door veroorzaakt? Nu bleek dat hiervoor werkelijk de maan verantwoordelijk was. Deze oefent op het gesteente dezelfde krachten uit als op het water van de oceanen die daardoor tijverschillen gaan vertonen. De getijden in het gesteente beïnvloedden ook de deeltjesbundels.

Dan waren er nog dagelijkse verstoringen die er raadselachtig uitzagen totdat werd opgemerkt dat ze samenvielen met de passage van een hogesnelheidstrein vele kilometers verderop. Deze trein verbruikt heel veel elektrische stroom; de stroom wordt opgevangen uit de bovenleiding en verlaat de trein via de rails. En dan? De elektriciteit volgt dan ondergrondse riviertjes

en komt daardoor in de buurt van de versneller, waar vervolgens de gebruikte magneetvelden worden verstoord.

Toen ook deze stoorzender was opgespoord en verdisconteerd (een staking van het treinpersoneel kwam als geroepen; nog nooit had de versneller zo nauwkeurig kunnen werken), bleek er niettemin nog iets aan de hand te zijn dat niet goed werd begrepen: jaarlijks, op ongeveer dezelfde datum, treedt er een storing op. Die bleek veroorzaakt te zijn door een maatregel van het kanton Genève: voordat de winter invalt, verlaagt men het waterniveau in het Meer van Genève, teneinde de schade van kruiend ijs in de winter beperkt te houden.

Inmiddels produceerde de machine grote hoeveelheden Z^o. Het was eigenlijk jammer dat er nergens enige ongerijmdheid leek te zitten in de bestaande theorie. Wat nog wel ontbrak, was de familie hadronen die een topquark zouden moeten bevatten. Pas in 1994 werden deze topquarks in hun kraag gevat. Daar was heel wat detectivewerk voor nodig geweest. Met behulp van de precisiemetingen van LEP, en met onze nieuwe theoretische methoden waren we in staat zeer uitgebreide berekeningen te doen om de resultaten te vergelijken. Hieruit bleek dat topquarks waarschijnlijk zeer zwaar zouden moeten zijn, ongeveer 175.000 MeV. De deeltjesbundels in LEP leverden niet voldoende energie om zulke zware deeltjes feitelijk te kunnen produceren en detecteren. Een nieuwe deeltjesversneller in het Fermi-laboratorium nabij Chicago kon dit wel. Het was een triomf voor ‘Fermilab’, maar ook voor de fysici van CERN, en zeker ook de theoretici die de nauwkeurige voorspellingen hebben kunnen doen, dat het topquark daar ten slotte werd gevonden, in 1994. De massa is nu vastgesteld op ongeveer 170.000 MeV.

Maar wat er nog steeds ontbreekt, is het Higgsdeeltje zelf. Dat zal vreemd klinken als ik zeg dat in zekere zin de lege ruimte helemaal is opgevuld met deze deeltjes. Ze maken als het ware de lege ruimte supergeleidend ten opzichte van de zwak-

ke kracht. Deze deeltjes zijn volledig onzichtbaar zolang ze in de laagste energietoestand zitten; ze geven de lege ruimte de eigenschappen zoals we die kennen. Maar het moet mogelijk zijn ze te verstoren. Wat je dan krijgt is te vergelijken met de golfbeweging die de wind kan veroorzaken in een korenveld. Niet de afzonderlijke halmen kunnen we zien, maar wel de golfbeweging. Zo zou je een omschrijving kunnen geven van het feitelijke spin-0-deeltje dat de theorie voorspelt, en dat de experimentator wél moet kunnen waarnemen.

We kunnen vele eigenschappen van dit Higgsdeeltje nauwkeurig uitrekenen, één ding echter niet: de massa. De massa van dit nog steeds voortvluchtige Higgsdeeltje zou theoretisch alles kunnen zijn tussen 1000 en circa 1.000.000 MeV. De lagere waarden zijn inmiddels experimenteel uitgesloten. Ook hier bleek de beste strategie te zijn allerlei deeltjesbotsingsprocessen met zo groot mogelijke precisie door te meten en met nauwkeurige berekeningen te vergelijken. Ook wanneer de energie nog te laag is om deeltjes zoals het Higgs en de topquark feitelijk te produceren, werpen deze deeltjes wel al hun schaduw vooruit, en leveren ze een detecteerbaar effect op deze processen, welk afhankelijk is van hun massa. De overeenkomst tussen waarnemingen en berekeningen zijn het best wanneer de Higgs ongeveer 110.000 MeV zwaar is, maar de onzekerheid in de massa is groot, deze kan ook 50.000 MeV méér zijn.

In het jaar 2000 moest LEP worden ontmanteld om plaats te maken voor een nieuwe versneller die in dezelfde tunnel moet worden gebouwd, de ‘Large Hadron Collider’, LHC. Wat doe je met een auto die toch naar de sloop moet? Nog even kijken hoe hard hij rijden kan! Men besloot de laatste maanden de energie van de deeltjesbundels in LEP zo ver mogelijk op te voeren, verder dan waar de machine feitelijk voor ontworpen was. Lijkt het alsof er inderdaad Higgsdeeltjes uitkomen? Temidden van de miljoenen botsingen werd er een handjevol uitzonderlijke verschijnselen opgemerkt. Als die inderdaad door het Higgs-

deeltje werden veroorzaakt dan zou dat laatste ongeveer 115.000 MeV zwaar moeten zijn. Helaas was de onzekerheid nog erg groot; alternatieve verklaringen voor de waarnemingen zijn nog niet uit te sluiten. Om dat te kunnen doen zou men de machine nog zeker een jaar moeten laten draaien, of men zou er nog wat magneten bij moeten zetten om de energie nog verder op te voeren. Beide zouden een onaanvaardbaar uitstel van LHC impliceren. Na heftige discussies werd besloten dat het verstandiger is LHC niet verder uit te stellen. Met LHC immers zou men niet alleen het Higgs veel beter kunnen waarnemen, men zou er allerlei precisiemetingen aan kunnen verrichten. Wel is het zo dat nu de Amerikanen in Fermilab, bij Chicago, de beste kaarten in handen hebben om als eerste het Higgsdeeltje met zekerheid te detecteren; ze zouden dat moeten kunnen doen vóór LHC kan beginnen met meten, zeker als het Higgs ‘slechts’ 115.000 MeV zwaar is.

Inmiddels weten we na verdere analyse van de LEP-experimenten dat de waargenomen signalen twijfelachtiger zijn dan eerst werd gedacht. Ik denk dat we er spijt van zouden hebben gekregen als na een jaar draaien LEP nog steeds geen zekerheid had kunnen bieden, en dat de beslissing alle aandacht nu aan LHC te wijden de juiste was. Maar alleen de (niet zo verre) toekomst zal het zeggen.

Men acht het zeer waarschijnlijk dat het Higgs niet zwaarder is dan pakweg 180.000 MeV. Niet alleen zullen we dit in de nabije toekomst weten, we zullen ook kunnen vaststellen of er wellicht niet twee of meer soorten Higgsdeeltjes zijn. In de meer ambitieuze theorieën wordt hier druk over gespeculeerd.

Stel dat er één Higgs wordt ontdekt conform de theorie. Wat dan? Dan hebben we wat we voortaan het ‘standaardmodel’ zullen noemen. Dit is een wiskundige beschrijving van alle nu bekende deeltjes en de krachten daartussen, waarmee alle waarnemingen die we aan de deeltjes hebben gedaan verklaard kunnen worden. Het standaardmodel is precies gebouwd vol-

Tabel 7. Het standaardmodel (zoals het er in 1995 uitziet).

naam	*symbool*	*massa* (MeV)	*lading*	N_c	
spin 1, ijkfotonen:					
foton	γ	0	0	1	$U(1)$
vectorbosonen van de zwakke kracht	Z^0	91.188	0	1	$SU(2)$
	W^+	80.420	+	1	
	W^-	80.420	−	1	
gluon	g	0*	0	8	$SU(3)$
spin 0, Higgs:					
	H^0	115.000 tot ∼ 200.000	0	1	
spin ½, quarks:					
I up	u	5*	⅔	3	
I down	d	10*	−⅓	3	
I charm	c	1600*	⅔	3	
I strange	s	180*	−⅓	3	
I top	t	170.000*	⅔	3	
I bottom	b	4200*	−⅓	3	
spin ½, leptonen:					
I e-neutrino	ν_e	∼ 0	0	1	
I elektron	e	0,5109989	−	1	
I μ-neutrino	ν_μ	$\sim 10^{-9}$	0	1	
I muon	μ	105,658356	−	1	
I τ-neutrino	ν_τ	$\sim 4 \times 10^{-8}$	0	1	
I tau	τ	1777	−	1	
spin 2, graviton:					
		0	0	1	

Tabel 7. Het standaardmodel (zoals het er in 1995 uitziet).
*Hierin betekent N_c het aantal verschillende kleurcomponenten dat een deeltje kan hebben. Deeltjes met N_c=1 zijn kleurloos. Massa's aangeduid met * zijn effectieve massa's die men zou krijgen als het omringende kleurveld werd weggelaten. De massawaarden van de neutrino's zijn nog erg onzeker.*

gens het recept van hoofdstuk 12. Voorzover we weten is er niets dat er niet in past en toch zijn de formules niet uiterst ingewikkeld. Alle bekende fysica vloeit dus voort uit het standaardmodel; pas in hoofdstuk 20 beginnen we met speculaties over wat er zich nog buiten het standaardmodel bevindt. Tabel 7 bevat alle thans bekende fundamentele deeltjes of velden (iedere deeltjessoort wordt omschreven door een apart veld, vandaar dat we soms het woord ‘veld’ en soms het woord ‘deeltje’ gebruiken, waarmee we dan hetzelfde bedoelen: een component in het standaardmodel).

Met ‘fundamenteel’ bedoelen we dan dat, voorzover wij weten, dit deeltje niet opgebouwd is uit andere soorten deeltjes (of: dit veld onafhankelijk is van de andere velden). We moeten natuurlijk niet weer in de oude fout vervallen: wat nu fundamenteel lijkt, kan morgen blijken opgebouwd te zijn uit ‘nog elementairdere’ dingen. Het zijn dus de ‘2002 fundamentele’ deeltjes. Een aantal aspecten van het standaardmodel zijn wat te technisch om hier in alle detail uit de doeken te doen. Het belangrijkste zal ik hier nu samenvatten.

We hebben drie soorten ijkvelden, en daarom drie ijkkoppelingconstanten, g_1, g_2, en g_3. Hun wiskundige structuur duiden we aan met de symbolen $U(1)$, $SU(2)$ en $SU(3)$. Er zijn drie ‘generaties’ fermionen. Iedere generatie bevat één quarkdoublet (zoals *u* en *d*) en één leptondoublet (zoals ν_e en *e*). Het aantal generaties in het standaardmodel wordt niet door de theorie voorgeschreven; het zouden er veel meer kunnen zijn. Maar toen LEP werd aangezet, kon men vrij snel zeer nauwkeurige metingen verrichten aan het Z^o-boson, en uit deze metingen kon men concluderen dat het in precies drie soorten massaloze (of althans zeer lichte) neutrino's uiteenvalt. Zouden er meer soorten massaloze neutrino's zijn, dan zou de levensduur van dit Z^o een beetje korter zijn. In onze huidige constructie van het standaardmodel bevat iedere generatie één massaloos neutrino. Er kunnen niet meer dan drie zulke generaties zijn. Dit sluit

niet uit dat er misschien andere soorten generaties van fermionen kunnen zijn waarvan de neutrino's een zeer grote massa hebben, maar van zulke deeltjes is nog geen spoor aangetroffen.

Het nog steeds voortvluchtige Higgsdeeltje is degene die een heleboel van het zware werk opknapt. Alle deeltjes, zowel de ijkfotonen als de fermionen als ook het Higgsdeeltje zelf, hebben hun massa te danken aan dit deeltje. Het Higgsdeeltje zelf is nog steeds niet ontdekt, maar het *veld* dat bij het Higgsdeeltje hoort, laat zich overal voelen. Als er geen Higgsveld was zouden de symmetrieën van de theorie het onmogelijk maken dat quarks of leptonen massa hebben. Dit heeft weer te maken met behoud van spin maar de details van dat argument moet ik u schuldig blijven. Het belangrijkste is dat *alle deeltjes van het standaardmodel hun massa krijgen doordat ze met het Higgsveld reageren*!

Omdat er zo veel verschillende manieren zijn waarop fermionen met het Higgsveld kunnen wisselwerken, ontstaan hierdoor niet alleen de massa's maar komt er ook nog meer structuur in de theorie. Nu er drie generaties zijn, is er plaats voor interacties die *PC*-schending geven, zodat ook het uiterst zeldzame verval van K_{lang} in twee pionen nu in het model past. Op de wiskundige reden hiervoor wil ik nu maar niet in gaan.

Volledigheidshalve is er in tabel 7 nog een ‘deeltje’ opgenomen, het zogenaamde graviton. Dit is de voortbrenger van de *zwaartekracht*. Het lijkt een onvermijdelijke consequentie te zijn van de theorie der zwaartekracht en de quantummechanica dat er zo'n quantum van de zwaartekrachtsvelden is. De spin ervan moet 2 zijn. Het is echter nog nooit aangetoond en dat zal nog wel even zo blijven.

Uiteindelijk worden de massa's van de deeltjes in het standaardmodel en de sterkte van hun onderlinge interacties bepaald door een aantal fundamentele *natuurconstanten*. Dit is een lijst van 26 getallen die je bij de tabel moet voegen. Bij ie-

dere wiskundige behandeling van dit model hoort deze lijst van getallen. Zij worden door geen enkele theorie voorgeschreven. Het zijn *onafhankelijke vrije parameters* van ons model. Bijna alle zijn tot in zekere nauwkeurigheid uit de experimentele gegevens bepaald.[1]

Ik wil zo duidelijk mogelijk beklemtonen hoe bijzonder het standaardmodel eigenlijk wel is, ook al zitten er ongeveer 26 getallen in waarvan we niet weten waarom ze de waarden hebben die ze hebben, zodat we dus ook niet precies weten hoe groot ze zijn; we kunnen ze niet uitrekenen. Maar als je die getallen met zekere nauwkeurigheid kent, kunnen *alle andere natuurverschijnselen* die we kennen wél 'in principe' worden uitgerekend. Alle eigenschappen van de fundamentele deeltjes, de hadronen, de atoomkernen, atomen, moleculen, substanties, weefsels, planten, dieren, mensen, planeten, zonnestelsels, melkwegstelsels, en misschien wel het hele heelal zouden eenduidige consequenties zijn van het standaardmodel. Sterker nog, voor hun globale eigenschappen maakt het waarschijnlijk niet eens veel uit welke precieze waarden die natuurconstanten hebben die we nu nog slecht kennen, zoals de massa van het Higgsdeeltje. Het effect van de zwakke kracht op de chemische eigenschappen van een atoom is bijvoorbeeld al uiterst moeilijk te meten (zij zou aan atomen een schroefzin geven zodat deze links van rechts kunnen onderscheiden). Haastig moet ik hieraan toevoegen dat deze mededelingen slechts van filosofisch belang zijn maar in de praktijk niks betekenen. We zijn helemaal niet in staat de eigenschappen van een pissebed af te leiden uit het standaardmodel, en dat zal ook nooit gebeuren. Ik zie de tentamenopgave al:

1 In de oudere versies van het standaardmodel werden de massa's van de neutrino's op nul gesteld. Het is thans praktisch zeker dat hun massa groter is dan nul, maar over de waarden daarvan bestaat nog veel onzekerheid. Dit is ook de reden waarom het aantal vrije parameters nu is gestegen naar zesentwintig. Zie verder hoofdstuk 18.

> ‘Bereken het aantal segmenten van *Asellus aquaticus* uitgaande van het standaardmodel. U kunt gebruikmaken van de volgende tabel voor de Higgsmassa en de *CP*-violerende parameters...’

Dat zal dus niet gaan. Het is niet de bedoeling van de theoretische fysica de indruk te wekken dat zij het werk van de bioloog, of ongeacht welke andere discipline, zou kunnen overnemen. Wat we wel willen stellen is dat we de natuurkrachten die verantwoordelijk zijn voor het aantal segmenten van dat beest kennen, maar niet dat we hun effect ook daadwerkelijk kunnen uitrekenen. Als u bedenkt dat we zelfs maar nauwelijks in staat zijn de effecten van de standaardkrachten op één hadron, zoals het proton, uit te rekenen (zelfs na enorme rekenpartijen van supercomputers wijken de resultaten vaak nog 5 tot 10 procent af van de waarnemingen), dan kunt u er gerust van uitgaan dat we ook niet kunnen uitrekenen wat er gebeurt als 10^{22} atomen de vorm van een pissebed aannemen. Volgen we de wetten van de quantummechanica, dan blijkt zelfs dat de eigenschappen van *twee atomen bij elkaar* verschrikkelijk veel moeilijker zijn uit te rekenen dan die van één atoom, en de eigenschappen van een willekeurig enkel atoom zijn weer vreselijk veel moeilijker dan de eigenschappen van het eenvoudigste atoom, dat van waterstof.

Dat we de krachten kennen is belangrijk omdat we ook weten aan welke wetten deze krachten strikt gehoorzamen. Zo zijn er de wetten van behoud van energie, van behoud van impuls, en zelfs van behoud van *informatie*, en dat laatste betekent, naar mijn stelligste overtuiging, dat voor de zogenaamde paranormale verschijnselen verklaringen gevonden moeten worden *binnen* de normale natuurkunde, normale biologie, psychologie, enzovoorts. U mag erover denken wat u wilt, maar als er van een paranormaal lijkend verschijnsel geen ‘gewone’ verklaring kan worden gevonden dan is dat op geen enkele wijze te rijmen met het standaardmodel.

17 Anomalieën

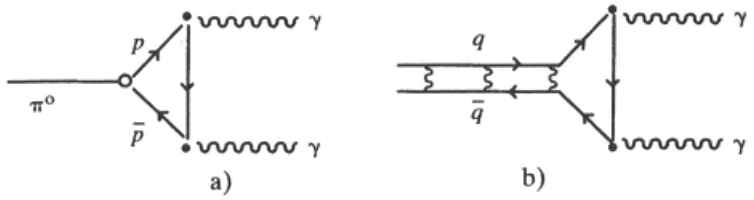
U heeft misschien de indruk gekregen dat al onze exercities er uiteindelijk op neer komen dat we almaar nieuwe deeltjes en structuren vinden en die dan gewoon inpassen in ons model. Min of meer toevallig zijn we nu uitgekomen op een model waar dan alles in past (althans voorlopig), en dat we 'standaardmodel' zijn gaan noemen. Maar is daar dan ook iets uit te concluderen wat we nog niet wisten, een voorspelling van iets geheel nieuws? Het verhaal van de anomalieën zou daar een antwoord op kunnen zijn. Maar als u de voorafgaande hoofdstukken al wat te technisch vond, moet ik u aanraden dit hoofdstuk over te slaan, want pas in de volgende hoofdstukken ga ik onze reis naar het kleine vervolgen.

Met 'anomalie' bedoelen we een heel speciaal verschijnsel in de deeltjestheorie. Het duikt voortdurend op wanneer we de gedragingen bestuderen van heel lichte Diracfermionen (deeltjes met spin ½) in een elektromagnetisch of een Yang-Millsveld. Het eerste voorbeeld had Veltman me al onderwezen toen ik nog studeerde.

Het neutrale pion kan tijdelijk overgaan in een proton en een antiproton. Deze kunnen elkaar vervolgens annihileren onder uitzending van twee fotonen. We geven dit proces in een diagram weer (figuur 19a). Als je het volgens de regels van de toenmalige theorie uitrekent, komt eruit dat het pion inderdaad uiteenvalt in twee fotonen, vrij precies zoals men het verval ook experimenteel waarneemt. Deze berekening was gedaan door Jack Steinberger, reeds in 1949. Tegenwoordig rekenen we dit uit door dit pion op te vatten als quark-antiquarkcombinatie (oscillerend tussen $u\bar{u}$ en $d\bar{d}$) maar de uitkomst wordt dan vrijwel dezelfde (figuur 19b).

Prachtig dus. Maar er klopt iets niet. Je kunt namelijk argumenteren dat het twee-fotonverval in eerste instantie verboden

had moeten zijn. Zowel de ‘naakte’ quarks als het ‘naakte’ proton in deze figuren zijn bij benadering massaloos. Niettemin moeten ze gedurende dit vervalsproces van draairichting veranderen. Dat doen massaloze deeltjes niet graag. Daarom had je moeten verwachten dat het neutrale pion veel minder heftig in twee fotonen uiteen zou mogen vallen dan het feitelijk doet.



Figuur 19. Het verval van een π^o *in twee fotonen. a) via proton-antiprotonannihilatie; b) via quark-antiquarkannihilatie*.

Niet alleen het experiment zegt dat deze naïeve redenering niet deugt, ook de nauwkeurige berekening geeft het goede resultaat. In eerste instantie leek dit een gevolg te zijn van de *renormeringsprocedure*. Deze bleek een afwijkende uitkomst te geven iedere keer als een massaloos fermion een baan aflegt in de vorm van een gesloten driehoek, zoals in de figuur. Linksdraaiende deeltjes kunnen dan ongestoord overgaan in rechtsdraaiende, en andersom. In het geval van het pion was men hier wel tevreden mee. De overeenkomst tussen de nauwkeurige berekening en het experiment nam iedere twijfel weg. We noemen dit verschijnsel de ‘driehoeksanomalie’.

Maar als langs deze sluikse weg linksdraaiende deeltjes in rechtsdraaiende kunnen overgaan en terug, wat gebeurt er dan als er geen rechtsdraaiende component bestaat, zoals bij het neutrino? Gelukkig bevat het pion geen neutrino's, want dan zou de theorie spaak lopen. We kunnen dan geen goede renor-

meringsprocedure bedenken voor het driehoeksdiagram. Maar, het neutrino reageert alleen zwak, en dat doen veel andere deeltjes ook. Daarom veroorzaakte het driehoeksdiagram problemen voor de zwakke-interactietheorie: ten gevolge van de anomalieën zou ons fraaie renormalisatievoorschrift in de soep draaien. Maar toen werd er iets bijzonders opgemerkt. Als nu in alle relevante interacties zowel de leptonen als de quarks bijdragen, en hun 'anomale bijdragen' in het driehoeksdiagram *elkaar precies opheffen*, dan is de theorie genezen. Dit is iets wonderlijks in het standaardmodel: de anomalieën ten gevolge van *e* en ν_e enerzijds en de quarks *u* en *d* anderzijds heffen elkaar in alle interacties waar dat nodig is precies op! Hetzelfde gebeurt met de muongeneratie en de *s*- en *c*-quarks. En ten slotte hebben we dan tau, top en bottom. Dit is waarom ik al eerder vermeldde: we willen evenveel lepton- als quarkgeneraties. Alleen dan kan de theorie gerenormeerd worden!

Het driehoeksdiagram komt ook voor bij de sterke interacties, als er alleen gluonen in het spel zijn. Ditmaal beschouwt men de symmetrie die in verband staat met behoud van draairichting van de lichtste quarks. Een gevolg van deze symmetrie zou moeten zijn dat sommige van de hadronen massaloos zijn en spin 0 hebben: de eerder genoemde Goldstonedeeltjes. Inderdaad hebben de pionen een kleine massa en spin 0. Echter, de regels van de wiskunde vertelde ons dat er een vierde deeltje met kleine massa had moeten zijn. Het enige wat hiervoor in aanmerking kwam was het èta-deeltje, η.

Maar het èta is veel zwaarder dan het pion. Dit werd het ètaprobleem genoemd. De quantumchromodynamica voorspelde een licht èta-deeltje, en dat is er niet. Weliswaar besefte men dat er een anomalie optreedt als je het argument voor het èta-deeltje wilt hanteren. Het argument dat het èta heel licht zou moeten zijn is gebaseerd op dezelfde gronden als het argument dat het π^o niet in twee fotonen zou mogen uiteenvallen: dezelfde driehoeksanomalie zou ook dit argument moeten ontkrachten.

Ditmaal echter was het erg moeilijk te begrijpen waar de natuur de massa van het èta vandaan haalt. Deze keer leek geen enkele berekening zo'n grote massa te geven. Dat was omdat men iets over het hoofd had gezien. De ware oorzaak van de anomalie ligt namelijk dieper dan de renormeringsprocedure. Die ligt in de aard van onze definitie van wat een *deeltje* is en wat een *antideeltje* is.

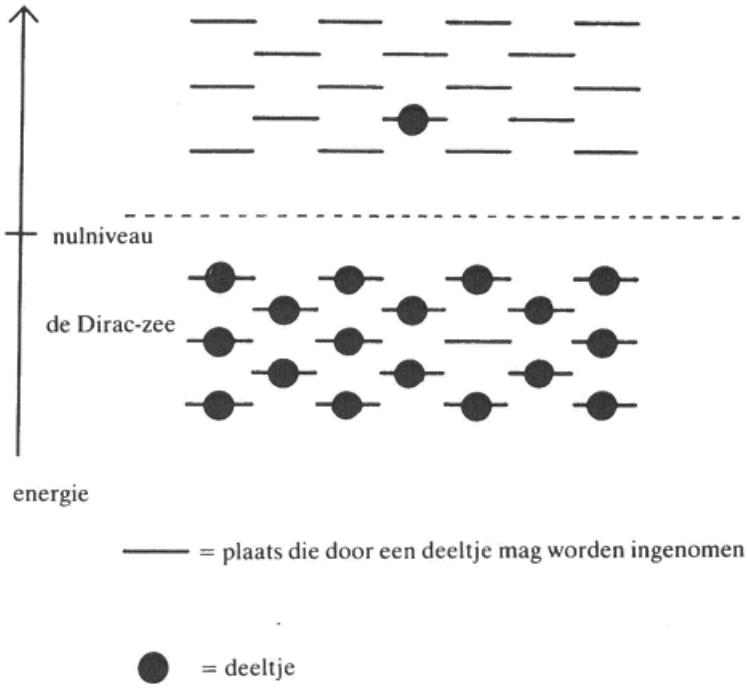
In een heel ‘primitieve’ omschrijving van de fermionen (de manier waarop Dirac voor de allereerste keer deze deeltjes ging begrijpen) is er één waarin nog helemaal geen sprake is van antideeltjes. Wat we hebben zijn ‘hokjes in de ruimte’ die elk al of niet met deeltjes zijn gevuld. Is de energie behorend bij een hokje negatief, dan stoppen we er een deeltje in, is de energie positief, dan laten we het leeg. Als onze totale voorraad van deeltjes dan precies uitkomt, krijgen we een ‘toestand met zo laag mogelijke energie’ (zoals straks duidelijker zal worden). We noemen deze toestand de *lege ruimte* of het *vacuüm*.

Maar misschien hielden we een deeltje over. Dat stoppen we dan in een hokje met positieve energie. Dat is dan écht een waarneembaar deeltje. Of we kwamen een deeltje tekort. Dat betekent dan dat een hokje met *negatieve* energie *leeg blijft*. Het maken van een *gat* met *negatieve* energie kost een *positieve* hoeveelheid energie. Zo'n gat ervaren wij dan óók als deeltje, met positieve energie, maar met elektrische lading (en eventuele andere eigenschappen) tegengesteld aan die van de oorspronkelijke deeltjes. Dit is nu wat wij een antideeltje noemen.

Een anomalie blijkt nu te zijn dat onder bijzondere omstandigheden een hokje met negatieve energie kan veranderen in een hokje met positieve energie (of andersom, maar dan moeten we de rest van dit betoog ook omkeren). Was dat hokje oorspronkelijk opgevuld, dan leek het eerst alleen maar deel uit te maken van een lege ruimte. Maar nu het opeens positieve energie krijgt komt daar ineens, als *deus ex machina* een deeltje tevoorschijn! Was het oorspronkelijke hokje leeg? Dan zou door

dit verschijnsel een antideeltje zomaar in het niets lijken te verdwijnen. Verandert een positief hokje in een negatief hokje, dan vindt het tegenovergestelde proces plaats.

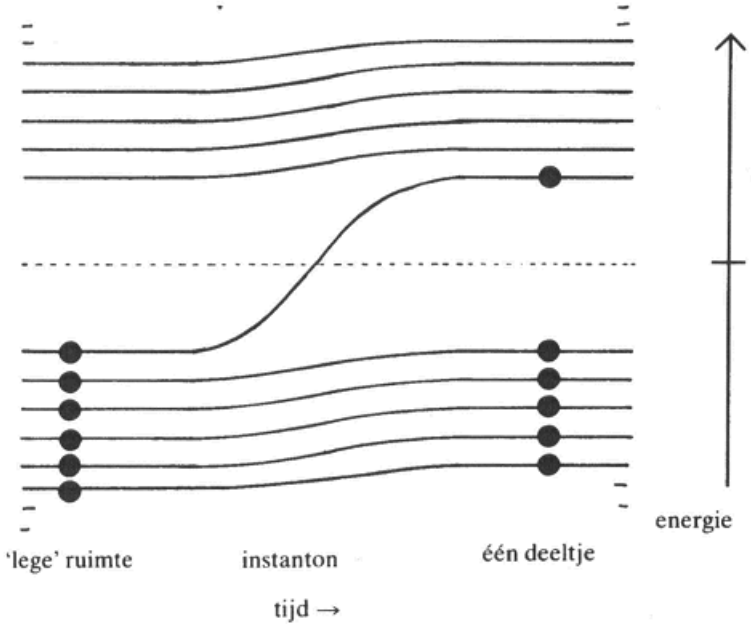
Het ètaprobleem was ontstaan omdat men de beschrijving van deeltjes zoals Dirac dat deed zo langzamerhand vergeten was, maar vooral ook omdat men zich in het begin niet realiseerde dat zulke merkwaardige overgangen van negatieve naar positieve energie mogelijk waren. Spelenderwijs hadden vier Russen, Alexander Balavin, Alexander Polyakov, Albert Schwartz en Yuri Tyupkin, een ijkveldconfiguratie bedacht die als een rare



Figuur 20. In deze figuur is één deeltje en één antideeltje aanwezig, volgens de Dirac-theorie.

kronkel in de ruimte en tijd kan optreden. Pas later werd duidelijk dat deze rare kronkel precies die kronkel was die nodig is om zo'n hokjesovergang te bewerkstelligen. Omdat die veldconfiguratie zoveel leek op een deeltje, maar dan in vier dimensies, gaven we er een naam aan die dat beklemtoont: een ‘instanton’, ofwel iets dat op een deeltje lijkt, doch slechts instantaan aanwezig is, om onmiddellijk weer te verdwijnen.

En nu weten we dat het ètadeeltje zijn massa aan instantonen te danken heeft. De linksdraaiende en rechtsdraaiende quarks gaan eigenlijk niet in elkaar over, maar het instanton doet steeds een van de twee in het vacuüm verdwijnen en tovert dan de ander uit het vacuüm tevoorschijn. En zo zien we dat steeds



Figuur 21. Een instanton kan van een negatieve-energieplaats verschuiven naar een positieve-energieplaats (of andersom).

meer details van onze theorie gingen kloppen.

Tot nu toe had u nog steeds kunnen volhouden dat we bezig zijn waargenomen verschijnselen in ons model in te passen, al kan ik u verzekeren dat de anomalieën nooit op andere manieren uit onze berekeningen weg te praten zouden zijn. Maar nu komt het nieuwe. Het voorafgaande ging over instantonen in de sterke *SU*(3)-ijkvelden. Maar in de veel zwakkere *SU*(2)-ijkkrachten moeten ze ook zitten. De ‘zwakke anomalie’, die ons dwong om evenveel lepton- als quarkgeneraties in te voeren, zou een direct effect kunnen hebben. Je kunt uitrekenen hoe de ‘zwakke instantonen’ zich moeten gedragen. Eén zo'n instanton werkt tegelijk in op de hokjes voor alle lepton- en quarksoorten. Het blijkt dat, als er zo'n instanton optreedt, gelijktijdig van iedere generatie drie quarks en één lepton verdwijnen. Je krijgt dan bijvoorbeeld de reactie

$$u + u + d + s + c + c + t + t + b \rightarrow e^+ + \mu^+ + \tau^+,$$

waar we gemakshalve antileptonen lieten ontstaan in plaats van leptonen te laten verdwijnen, maar u weet nu inmiddels wel dat dat niet zo veel verschil uitmaakt. Als u goed kijkt merkt u dat de totale elektrische lading in deze interactie behouden is. Dat zou niet meer zo zijn als je het τ-lepton (en zijn neutrino) zou weglaten. Dat zou niet mogen. Dit is dus waarom een theorie zonder het τ-leptonpaar niet goed kan zijn.

Omdat de baryonen uit drie quarks bestaan, en de exotische baryonen via ‘gewone’ zwakke interacties naar gewone baryonen kunnen overstappen, betekent dit dat er netto *drie* baryonen, zoals protonen, verdwijnen en er drie positronen (of antineutrino's) voor in de plaats komen. Dat betekent dat alle materie, die immers voor een groot deel uit protonen bestaat, uiteen kan vallen in de veel lichtere positronen! Een spectaculair resultaat, behalve als je het echt precies gaat uitrekenen: zo'n verval is uiterst zeldzaam. In de allereerste beginfase van

het heelal kan er echter een heel korte periode zijn geweest waar reacties zoals deze uiterst veelvuldig optraden. Misschien hebben we het huidige overschot van materie ten opzichte van antimaterie in ons heelal wel aan dit proces te danken. Helaas is ons begrip van de vroegste beginfase van het heelal zo rudimentair dat het (nog?) niet mogelijk is dit soort ideeën nauwkeurig uit te werken. Men probeert dit echter wel. Wat dan blijkt is dat waarschijnlijk het overschot aan materie boven antimaterie in het heelal in twee stappen moet zijn ontstaan. Eerst ontstond er een overschot aan antineutrino's, ten gevolge van processen die we hier nog niet besproken hebben. Daarna vonden er instanton-interacties plaats zoals op de vorige bladzijde beschreven, in omgekeerde richting, wat leidde tot een overschot aan baryonen.

Het opmerkelijke van de anomalie is dat we helemaal uitgegaan waren van een theorie met absoluut behoud van baryongetal. Maar nu hebben we *afgeleid* dat baryonen niettemin vergankelijk zijn. Later zullen we nog andere theorieën tegenkomen waarin dit ook op een andere manier gebeurt. Dus praktisch alle soorten materie zullen uiteindelijk instabiel zijn, maar ik kan u geruststellen: het kan vele jaren duren voordat er één proton of neutron in uw lichaam uiteenvalt (laat staan drie tegelijk), en dan nog merkt u daar niets van.

18 Neutrino's wegen

Langere tijd zijn we ervan uitgegaan dat neutrino's geen massa hebben. Dit was in feite een van de pilaren waarop het succes van onze zwakke-interactietheorie was gebaseerd. Als je aanneemt dat neutrino's geen massa hebben dan heb je alleen maar *linksdraaiende* neutrino's nodig. Rechtsdraaiende neutrino's komen gewoon niet voor (antineutrino's daarentegen draaien dan alleen rechtsom, niet linksom). Van wiskundig oogpunt bezien is dat prachtig, maar je kunt het toch wat onesthetisch vinden. Immers, hun ‘generatiegenoten’, de quarks, kunnen wel rechtsom draaien. We zeggen dat de quarks een rechtsdraaiende component hebben. Stel nu eens dat de neutrino's ook rechtsdraaiende componenten hebben. Omdat hun draaibeweging niet meer gekoppeld hoeft te zijn aan hun bewegingsrichting mogen de neutrino's in dat geval wel een massa hebben. (De wiskundige reden voor dit verband tussen draaiing en massa, dat ik al eerder heb genoemd, is niet zo gemakkelijk uiteen te zetten.)

Tot voor kort deden de neutrino's zich aan ons voor alsof ze strikt massaloos zijn. Het lijkt alsof ze zich met precies de lichtsnelheid voortbewegen. Maar er is een grens aan onze meetnauwkeurigheid. Als de neutrino's heel licht zouden zijn, bijvoorbeeld slechts een honderdduizendste van de massa van het elektron, zouden wij het verschil met een strikt massaloos neutrino in het laboratorium nooit kunnen opmerken. Maar, zoals ik zei, dan heb je wel een rechtshandige component voor de neutrino's nodig. Rechtshandige neutrino's zouden nog duizenden malen moeilijker te detecteren zijn dan gewone neutrino's.

Op dit punt nu komen de sterrenkundigen ons te hulp. Dat is niet de eerste keer en ook niet de laatste dat de sterrenkundigen ons iets wezenlijks vertellen over de elementaire deeltjes. Bijvoorbeeld: door de *neutrale-stroominteracties* (de zwakke

krachten die van het Z^o afkomstig waren) werden neutrino's ineens een essentiële schakel in de *supernova-explosie* van een ster. Toen men nog niets wist van de neutrale stroom dacht men dat bij zo'n explosie neutrino's ontstaan die de ster ongehinderd kunnen verlaten. Nu echter weten we dat deze tegen de buitenste schil van een ster opbotsen en die met kracht wegblazen. Deze nieuwe supernovatheorie, die veel beter met de waarnemingen overeenstemde, ondersteunde de neutrale-stroom-hypothese.

De sterrenkundigen wijzen ons nu al sinds de jaren zeventig op een kleine maar hardnekkige discrepantie in hún standaardmodel: de theorie voor het inwendige van de zon. De zon is een reusachtige kernreactor. Doordat ze zo dicht bij ons staat (in vergelijking met alle andere sterren) kan men er heel veel metingen aan verrichten. Deze metingen verschaffen ons de chemische samenstelling, massa en temperatuur van de zon. Veel van de kernreacties die zich in de zon voordoen, kan men in het laboratorium nabootsen. Andere kunnen met grote precisie worden doorgerekend. Slechts enkele reacties zijn minder nauwkeurig bekend. Uit metingen aan onder andere meteorieten kan men bovendien afleiden wat de samenstelling van de materie was toen de zon ontstond. En zo kon men een model construeren van onze zon.

Het zonnemodel klopt heel goed. Ook veel andere sterren in het heelal kan men met dezelfde technieken beschrijven. Het zonnemodel vertelt ons duidelijk en precies wat de temperatuur en dichtheid diep in het inwendige van de zon zijn. Een fantastische manier om het model te checken is door trillingen in de zon, ‘zonnebevingen’, te registreren. Men stelt variaties vast in de zonnediameter, die erop wijzen dat de oppervlakte trilt. Net als seismologen dat met de aarde doen, kan men de bevindingen in verband brengen met eigenschappen zoals dichtheid, samenstelling en temperatuur diep in het binnenste van de zon.

Deze bevindingen stemmen prachtig overeen. De sterrenkundigen verzekeren ons dat het allemaal klopt. Slechts één ding klopt niet. Uit diverse kernreacties zouden ook neutrino's moeten ontstaan. Dit zijn voornamelijk neutrino's van het elektrontype (ν_e en $\bar{\nu}_e$) omdat de andere in combinatie met muonen en tau's zouden moeten ontstaan, en daarvoor is de energie van de deeltjes in de zon ontoereikend. Er zijn nu diverse experimenten uitgevoerd met het doel deze zonneneutrino's te registreren. Dat is uiteindelijk gelukt, maar het kostte grote moeite. We detecteren namelijk veel minder neutrino's dan verwacht. Er werden allerlei pogingen gedaan de discrepantie te begrijpen en weg te werken. Neutrino's zijn bijvoorbeeld erg gevoelig voor temperatuur. Misschien is de zonnetemperatuur een beetje lager dan verwacht? Maar hoe men ook rekende, dat kwam er niet uit; de zonnetemperatuur moest goed zijn. Een lagere temperatuur zou ook niet kloppen met de seismologische metingen. Vervolgens werden de experimenten verbeterd en werden er nieuwe methoden bedacht om meer neutrino's te meten. De onderzoekers zijn het er echter over eens: er zijn ongeveer driemaal te weinig neutrino's. Iets klopt er niet in het standaardmodel.

Wat heeft dit met de massa van het neutrino te maken? Welnu, een neutrino met massa zou overgangen kunnen maken naar andere neutrinosoorten. De situatie is enigszins vergelijkbaar met de omschrijving die ik gaf van de *K*-mesonen, maar nog wat ingewikkelder. Als ν_e's overgaan in ν_μ's of ν_τ's dan zouden deze geen enkel signaal achterlaten in de experimentele opstellingen, zodat het zou lijken dat er veel minder neutrino's zijn. We spreken van neutrino-oscillatie. Neutrino-oscillatie is alleen mogelijk als de neutrino's niet massaloos zijn, zoals in de oorspronkelijke versie van ons standaardmodel. Ik heb het langere tijd maar moeilijk gevonden geloof te hechten aan de neutrino-oscillatiehypothese als verklaring voor de ontbrekende zonneneutrino's. Ik had gedacht dat er maar heel weinig neutri-

no's langs die weg zouden kunnen ontsnappen. Ze zouden immers even vlot weer terug kunnen draaien naar v_e?

Maar ons theoretisch inzicht is inmiddels aanzienlijk verbeterd. In 1985 werd er een heel ingenieuze theorie geformuleerd door de Russen S. Mikheyev en A. Smirnov, die gebaseerd was op een eerder idee van CP-expert Lincoln Wolfenstein. Dit zogenaamde MSW-mechanisme werkt als volgt. Terwijl neutrino's oscilleren reageren ze ook, zij het uiterst zwakjes, met de materie in de zon. Dankzij de aanwezigheid van elektronen kunnen de elektronneutrino's overgangen maken naar *W*-bosonen en terug, terwijl de andere neutrinosoorten alleen de *Z*-bosonen gebruiken kunnen. Het gevolg hiervan is dat de voortplantingssnelheid van elektronneutrino's in de zon een heel klein beetje anders is dan die van de andere neutrino's. Men rekende voor dat er tengevolge van de *combinatie* van deze interacties met de neutrino-oscillaties de elektronneutrino's een bijna volledige metamorfose kunnen ondergaan in bijvoorbeeld muonische of tau-neutrino's. Ik geef toe, het argument is wel een heel lange serie van berekeningen en hypotheses. Maar we nemen nu aan dat alle neutrino's massa hebben. Waarschijnlijk is het elektron-neutrino het lichtste, het muon-neutrino rond de 0,001 eV, ofwel minder dan een honderdmiljoenste van de elektronmassa. De precieze waarden kennen we nog niet. In tabel 7 is onze ruwe schatting aangegeven.

Maar er kwamen nog meer aanwijzingen. In Japan bevindt zich een zinkmijn genaamd Kamioka. 1000 meter onder de grond werd daar een deeltjesdetector gebouwd, genaamd Kamiokande. In dit apparaat bevond zich 4500 ton zeer zuiver water, met daarin duizenden uiterst gevoelige lichtsensoren, waarmee de zwakke lichtflitsjes die veroorzaakt worden door zich snel voortbewegende deeltjes konden worden gedetecteerd. De detector was ontworpen om diverse uiterst moeilijk waarneembare interactieverschijnselen tussen elementaire deeltjes op te kunnen sporen, zoals een mogelijk uiteenvallen van het

proton (waarover later meer). Wat nieuw was aan deze detector is dat men niet alleen de aanwezigheid van neutrino's kon vaststellen, maar ook om welk *type* neutrino's het gaat, en tevens de *richting* kon bepalen van waaruit de neutrino's binnenkwamen. Met dit apparaat werden neutrino's gedetecteerd die afkomstig waren van de supernova-explosie die zich in 1987 voordeed ver weg in de ruimte, in de Grote Magelaanse Wolk. Metingen aan neutrino's lieten duidelijk zien dat er iets mee aan de hand was, maar om meer over de neutrino's te weten te komen, moest een groter apparaat worden gebouwd, dat *Super-Kamiokande* ging heten. Hierin bevond zich 50.000 ton zuiver water.

Op 1 april 1996 begon men met de waarnemingen. In de eerste plaats trof men een scherp signaal aan van de (verzwakte) neutrino's aan die vanuit de zon kwamen. Maar er is nog een bron van neutrino's. Vanuit de diepten van het heelal worden deeltjes met hoge energie (bijna uitsluitend protonen) op ons afgevuurd. Hoog in de aardatmosfeer botsen ze tegen de luchtmoleculen, en daarbij ontstaan pionen. De (zowel positief als negatief) elektrisch geladen pionen vallen alle uiteen in een muon en een mu-neutrino. We schrijven bijvoorbeeld $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. Vervolgens valt het muon uiteen in een elektron, een mu-neutrino en een elektron-neutrino: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$. Alles bij elkaar verwachten we daarom twee keer zo veel mu-neutrino's als elektron-neutrino's, die ons vanuit alle hoeken zullen bereiken. Neutrino's zullen ons óók van onderaf bereiken! Zonder een centje pijn gaan namelijk de neutrino's die in Amerika in de atmosfeer ontstaan door de aarde heen, en die komen in Japan van beneden de detector binnen. Echter, en nu komt het, van deze neutrino's bleek dat de verhouding twee-op-één was verstoord! Er waren te weinig mu-neutrino's, of te veel elektron-neutrino's. Op hun weg door de aarde is er iets met deze neutrino's gebeurd. Men neemt nu aan dat er onderweg mu-neutrino's in iets anders zijn omgezet, vermoedelijk tau-neutrino's. De weg door de aarde heen is aanzienlijk korter

dan de weg van de zon naar de aarde. Berekeningen laten zien dat hier waarschijnlijk het massaverschil van het mu-neutrino en het tau-neutrino een rol speelt. Al deze massa's vallen echter nog steeds in het niet, in vergelijking met die van de andere deeltjes. Het is niet vanzelfsprekend dat het tau-neutrino het zwaarste neutrino is, maar dat lijkt voor de hand te liggen. Het wachten is nu op meer neutrino-experimenten. Er zijn diverse plannen om in de grote deeltjesversnellers goed gerichte bundels neutrino's te creëren, die daarna honderden kilometers verderop in uiterst gevoelige detectoren worden opgevist. Vanuit CERN, nabij Genève, kan men neutrino's sturen naar een detector genaamd Gran Sasso, die zich in een tunnel onder de Mont Blanc bevindt. Daar hoopt men dan te kunnen vaststellen hoe muon-neutrino's in tau-neutrino's kunnen overgaan. Het is van belang over verschillende afstanden bij verschillende neutrino-energiewaarden dit soort overgangen zo nauwkeurig mogelijk te meten. In het aangepaste standaardmodel komen zeker zes nieuwe parameters voor die men zo hoopt te kunnen meten. Sommige ervan zouden zelfs heel nauwkeurig vast te stellen zijn, maar andere zijn voorlopig nog niet of vrij slecht bereikbaar.

Met de rechtsdraaiende componenten voor de neutrino's erbij lijkt het standaardmodel volmaakt. De leptonen zijn nu net als de quarks. Ze hebben massa en ze kunnen in elkaar overgaan. Alleen de wijze waarop ze gevoelig zijn voor de ijkkrachten is verschillend, maar het is allemaal keurig in formule te brengen.

19 Bedrieglijke volmaaktheid

Ziezo, op een paar kleine technische probleempjes na is de theoretische natuurkunde klaar. We hebben een model dat alles wat we willen weten in formule heeft gebracht. Wat willen we nog meer?

Welnu, het standaardmodel is mooi, maar niet perfect. Je zou allereerst kunnen gaan klagen over die 26 onberekenbare getallen. Maar als dat de enige klacht zou zijn dan was daar waarschijnlijk niet veel aan te doen. Er werden natuurlijk allerlei ideeën geopperd omtrent de herkomst van deze getallen, en theorieën over hoe we ze zouden kunnen voorspellen. Het probleem met al deze theorieën is dat de aangegeven argumenten nooit dwingend zijn. Waarom zou de natuur zich aan een of andere toverformule storen als er ook zonder die formule nergens echte tegenstrijdigheden zouden optreden? Wat we zouden willen hebben, is een fundamenteel nieuw principe, zoals de relativiteitstheorie, echter *zonder* alle reeds bekende principes overboord te gooien; die hebben ons immers zo prima geholpen om het standaardmodel te vinden! De beste plaats waar we zo'n nieuw principe zouden moeten zoeken, is daar waar ons model ook andere tekortkomingen vertoont. En die zijn er.

Een algemeen geldige regel in de deeltjesfysica is dat wanneer deeltjes met grotere energie tegen elkaar botsen, het resultaat van de botsing bepaald wordt door steeds kleinere structuren in ruimte en tijd. Stel dat we een deeltjesversneller hadden die duizenden malen meer bewegingsenergie aan de deeltjes meegeeft dan thans mogelijk is. De resultaten van de botsingen worden dan bepaald door veel kleinere details binnen in die deeltjes dan voorheen. Zegt het standaardmodel ook dan precies wat er zal gebeuren? Kortom, laten we nogmaals, als Gulliver, een reis gaan maken naar de wereld van de nog kleinere structuren.

Het standaardmodel is een wiskundig bouwwerk. Het voorspelt inderdaad ondubbelzinnig hoe de wereld van het nog kleinere eruit zal gaan zien. Maar er zijn genoeg zaken die onze argwaan opwekken. We hebben onze denkbeeldige supermicroscoop op scherp gesteld en we zien hordes naakte fundamentele deeltjes rondlopen. Het standaardmodel dicteert hun bewegingen. Ook door de supermicroscoop gezien bevat het standaardmodel 26 natuurconstanten. Echter, deze moeten daar nu heel precies op elkaar afgestemd zijn. Zou je één of meer van die constanten ook maar een heel klein beetje anders kiezen, dan zouden de meeste van onze deeltjes massa's krijgen die vergelijkbaar worden met de superhoge energie van de versneller die hiermee correspondeert. Dat de deeltjes in werkelijkheid allemaal een massa hebben die bij een veel lagere energie hoort, wordt zo ineens heel onnatuurlijk.

Dit heet het *fijnregelingsprobleem*. Door de microscoop gezien zijn de natuurconstanten met onbegrijpelijke precisie op elkaar afgestemd. Er is hier iets heel ernstig mis. Het probleem is dat er *wiskundig* niets op is aan te merken. Maar de geloofwaardigheid van het standaardmodel wordt snel minder als je naar superkleine afstanden en tijdsintervallen kijkt, of, wat op hetzelfde neerkomt, als je wilt uitrekenen hoe deeltjes met superhoge energieën tegen elkaar zullen botsen. En waarom zou het model daar nog geldig zijn? Er zouden allerlei nog totaal onbekende superzware nieuwe deeltjes kunnen bestaan die alleen bij voorlopig onbereikbare energieën tot leven kunnen worden geroepen, en die de wereld welke onze Gulliver wil bezoeken totaal anders zouden maken dan we nu denken.

Kortom, als we van die ongeloofwaardige fijnregeling afwillen, hebben we een nieuw probleem geschapen: hoe kunnen we het standaardmodel zodanig wijzigen dat fijnregeling niet meer nodig is? Dat daar wijzigingen voor nodig zouden zijn, staat vast. Dit betekent dat er zeer waarschijnlijk wel degelijk een

grens is waar de geldigheid van het ‘gewone’ standaardmodel ophoudt. Als je het zo bekijkt, is het standaardmodel niets anders dan een wiskundige benadering die we hebben kunnen creëren op een zodanige manier dat alle ons nu bekende natuurverschijnselen erin passen, maar iedere keer als een nieuwe machine met een groter energiebereik wordt aangezet, mag je verwachten dat het zal moeten worden bijgesteld.

Hoe hadden we ooit anders kunnen denken? Waar haalden we de ‘arrogantie’ vandaan te denken dat we misschien de ultieme theorie te pakken zouden hebben? Als je zo tegen de dingen aankijkt, is ons probleem misschien wel het tegenovergestelde van de vraag waar het standaardmodel ophoudt: hoe komt het dat het standaardmodel zo buitengewoon goed werkt, en dat we nog steeds niets hebben gemerkt van een volgende generatie van deeltjes en krachten die buiten het standaardmodel vallen?

De vraag ‘Wat komt er na het standaardmodel?’ houdt ons nu al jaren bezig. Tot op dit punt heb ik u met enig gezag kunnen vertellen over wat we weten. Vanaf nu ga ik speculeren over al datgene wat we niet weten. Natuurlijk kan het zijn dat de natuurkunde zoals wij die kennen een keer ophoudt en er iets heel anders voor in de plaats komt. Maar dat geloven we niet. Als de geschiedenis ons één ding geleerd heeft, is het dat de werkelijkheid altijd, achteraf gezien, heel logisch samenhangt met wat we al lang wisten.

20 Een onzichtbare wereld

In twee richtingen proberen we nu te zoeken naar mogelijkheden om het standaardmodel uit te breiden. Ik duid ze gemakshalve aan als 1: zeldzame nieuwe deeltjes en zwakke nieuwe krachten, en 2: zware nieuwe deeltjes en nieuwe structuren bij zeer hoge energie. Om met het eerste te beginnen, er zouden deeltjes kunnen bestaan die heel moeilijk te maken en te detecteren zijn, en daarom tot nu toe aan onze aandacht zijn ontsnapt. Alle deeltjes die *sterke krachten* op bekende deeltjes uitoefenen kunnen zich onmogelijk voor ons verborgen houden. Volgens de ijzeren wetten van de deeltjestheorie worden zulke deeltjes dan dikwijls gecreëerd, desnoods als combinatie deeltje-antideeltje (behalve wanneer hun massa te groot is, maar dat valt onder punt 2). De enige lichte deeltjes die zich voor ons verborgen kunnen houden, zijn deeltjes die slechts uiterst zwakke krachten uitoefenen op alle ons bekende deeltjes.

De eerste toevoeging waar men dan aan denkt, is inmiddels al gerealiseerd: de *rechtsdraaiende neutrino's*, beschreven in hoofdstuk 18. Deze zijn zelfs voor de zwakke kracht ongevoelig! Slechts door toedoen van het veld van het Higgsdeeltje kunnen ze in linksdraaiende neutrino's veranderen, waarna ze (zeldzame) zwakke interacties kunnen aangaan. Hoeveel meer van zulke verborgen objecten zouden er kunnen zijn? Het *graviton* heb ik al genoemd. Dit voelt slechts de zwaartekracht, en deze kracht is nog veel zwakker dan de zwakke kracht. Dat u niettemin de zwaartekracht duidelijk ‘aan den lijve’ ondervindt, komt doordat alle deeltjes in de hele aarde deze kracht aanwenden om alle atomen in uw lichaam naar *dezelfde kant* toe te trekken (naar beneden dus). Alleen maar omdat zowel de aarde als uw lichaam uit zo talloos veel atomen bestaat, merkt u het bestaan van deze kracht. In een ruimteschip zitten ook veel atomen, maar niet zoveel als in de gehele aarde en, wel, van de zwaarte-

kracht merkt een ruimtevaarder al bijna niets meer. De zwaartekracht werkt over zeer grote afstanden, dit hangt samen met het feit dat de drager ervan, het graviton, een deeltje is met rustmassa gelijk aan nul. Je kunt je afvragen of er niet nog meer van dergelijke krachten zijn. Er zou bijvoorbeeld een component in de zwaartekracht kunnen zijn die alleen maar op elektronen of alleen op de baryonen inwerkt en niet, zoals de gewone zwaartekracht, op allebei, evenredig met hun massa. De Hongaarse baron Loránd Eötvös heeft in de jaren vijftig uiterst zorgvuldige experimenten gedaan om naar selectie-effecten in de zwaartekracht te zoeken. Later werden deze metingen verfijnd door Robert Dicke (die ondanks alle moderne elektronica grote moeite had Eötvös te verbeteren).

Er werd ook gezocht naar afwijkingen in de wetten van de zwaartekracht die zouden optreden als er een component is die slechts over kortere afstanden werkt (en dus veroorzaakt wordt door een deeltje dat, anders dan het graviton, een kleine maar niet geheel verwaarloosbare rustmassa heeft). Enige jaren geleden werd er geclaimd dat uit de notities die Eötvös had gemaakt af te leiden zou zijn dat er wel degelijk een selectie-effect is (verschillende stoffen zouden een heel klein beetje verschillend op de zwaartekracht reageren). Eötvös zelf heeft altijd volgehouden dat de uiterst kleine spreiding in zijn meetresultaten niet significant is, en we geloven nu weer dat hij daarin gelijk had. Maar een naam voor zo'n eventuele nieuwe kracht was gauw gevonden: ‘de vijfde kracht’. Ondanks verwoede pogingen is er nog geen vijfde kracht aangetoond. Theoretisch kunnen we het bestaan van zo'n kracht niet uitsluiten, maar ik vind dat mét zo'n kracht erbij het standaardmodel er zeker niet fraaier op zou worden.

En ten slotte zou je kunnen denken aan een heleboel andere soorten uiterst zwak reagerende deeltjes. Zijn die er? Bedenk wel dat er tot nu toe slechts drie neutrinosoorten gevonden zijn. En meer zijn er waarschijnlijk niet. Dit weten we uit zeer nauwkeurige metingen met LEP. Als er meer neutrinosoorten waren

dan ν_e, ν_μ en ν_τ zou het Z^o-deeltje ook in deze neutrino's kunnen vervallen, en dat zou de levensduur van Z^o korter maken dan wat men heeft gemeten.

Als de wereld van elementaire deeltjes zo veel uiterst zwak reagerende deeltjes zou bevatten, waarom zouden er dan niet ook een heleboel ‘een beetje zwak’ reagerende deeltjes zijn, in plaats van slechts drie, die bovendien alle een duidelijke rol lijken te spelen (ze hebben een welverdiende plaats in het standaardmodel)? Persoonlijk denk ik dat het antwoord is: er zijn maar heel weinig van zulke superzwak reagerende deeltjes, misschien wel helemaal geen. Maar ja, ook ik heb de wijsheid niet in pacht en er zijn allerlei uitbreidingen van het standaardmodel bedacht waarin wél plaats is voor superzwak reagerende deeltjes.

En ook hier geven de astronomen ons te denken. Zij zeggen dat in de ons omringende ruimte materie moet zitten die niet reageert met de zichtbare sterren en gaswolken, maar zijn aanwezigheid uitsluitend verraadt door zijn zwaartekrachtsinvloed op sterren en sterrenstelsels. Dit voor ons onzichtbare deel van de wereld bevat zelfs aanzienlijk meer materie dan het zichtbare deel! De astronomen verzekeren ons dat ‘conventionele’ verklaringen zoals donkere stof- of gaswolken, los zwervende ‘planeten’ of zelfs zwarte gaten niet aannemelijk zijn. Zij zijn niet in te passen in hun beschrijvingen van het ons omringende heelal, en bovendien heeft men inmiddels methoden om de aanwezigheid van deze slecht zichtbare objecten toch te kunnen vaststellen: ze zijn er niet.

Uit wat voor soort deeltjes deze zogenaamde ‘donkere materie’ dan wel bestaat, weet nog niemand. Zijn het wellicht nog onbekende, zwaardere broertjes of neefjes van de neutrino's, ofwel ZIZO'S (Zwak Interagerende Zware Objecten[1])? Hier bestaan allerlei ideeën en theorieën over (bijna even veel als het aantal onderzoekers dat hierover een mening heeft).

1 Mijn vertaling van WIMP'S, Weakley Interacting Massive Particles.

21 De grote woestijn

Onverschrokken reist Gulliver verder. Het standaardmodel zegt wat hij zal zien als hij protonen en neutronen zo ver uitvergroot dat hij nog een duizendste van hun diameter kan onderscheiden. Maar wat daarna komt is onbekend. En ik heb het dan over heel *zware* deeltjes, die krachten overbrengen over slechts ultrakorte afstanden. We gaan ons nu concentreren op mogelijke structuren die er zouden kunnen zijn op afstandsschalen tussen 1/1000e en 1/10.000.000.000.000.000.000e (ofwel 10^{-19}) van de protondiameter.

Het ogenschijnlijk absurde getal dat ik noemde, betekent dat het nu betreden gebied maar liefst zestien ordes van grootte (zestien nullen extra) bevat. Dat is even ver als het grootteverschil tussen een woonhuis en een atoomkern.

Misschien is die nieuwe wereld wel even ingewikkeld als de vorige, die dus in de voorafgaande twintig hoofdstukken is beschreven. Maar zij zou ook een beetje eenvoudiger kunnen zijn, in de zin dat alle natuurwetten direct geëxtrapoleerd zouden kunnen worden over het hele gebied. De regeltjes die ik in hoofdstuk 11 omschreef lijken zonder meer van toepassing te blijven. Misschien krijgen we weliswaar steeds weer andere deeltjes en andere velden, maar hoe ik de vergroting van mijn denkbeeldige microscoop ook instel, steeds zullen we weer dezelfde grondregels aantreffen voor objecten met spin 1, spin ½, en spin 0 (zolang we de *zwaartekracht* als verwaarloosbaar mogen veronderstellen, maar daarover straks meer).

Er zijn over deze wereld nagenoeg geen experimentele gegevens, en dus kunnen we er niets met absolute zekerheid over zeggen. Niettemin neemt men algemeen aan dat de grondregels van kracht zullen blijven. Voor de rest kunnen we nu onze fantasie de vrije loop laten. Theoretici komen dan met drie soorten ‘scenario's’. We beginnen met wat Raoul Gatto tijdens een con-

ferentie eens het ‘nulde scenario’ noemde.

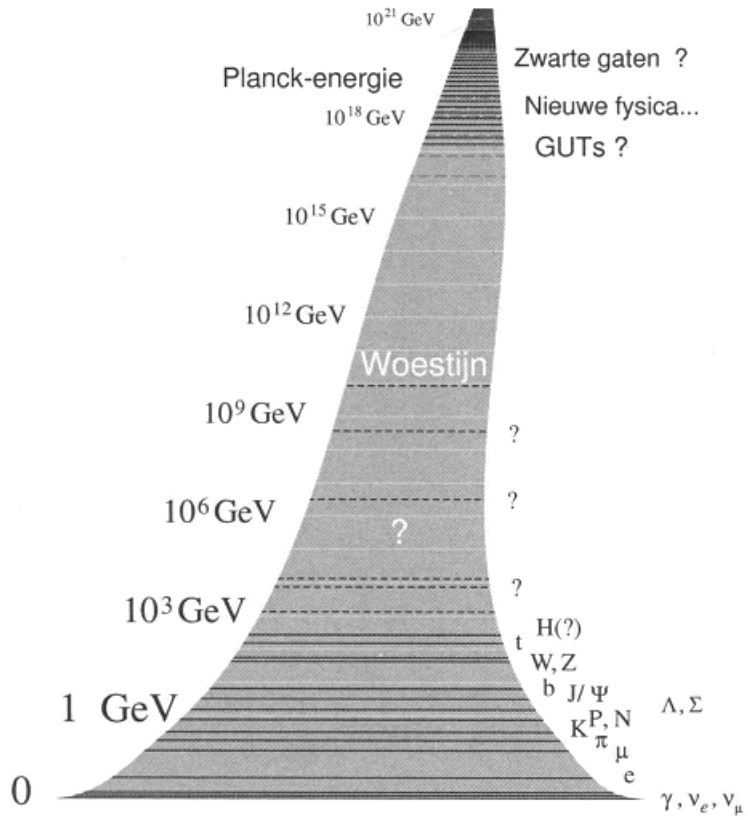
Volgens het nulde scenario is het standaardmodel helemaal goed. Er is dan geen enkele verdere structuur meer. De natuurwetten binnen deze wereld worden door andere systemen van natuurwetten op de afstandsschaal van 10^{-19} protondiameter en kleiner bepaald, en voorbij dat punt geldt het standaardmodel. Je krijgt in dit geval een geweldig fijnregelingsprobleem: op 10^{-19} protondiameter moeten de knoppen van de natuurconstanten verschrikkelijk precies op elkaar zijn afgesteld. Waarom dat zo is, daar snap je dan geen snars meer van, maar komaan, laat dat dan maar een probleem zijn voor de filosofen.

Wiskundig gezien is dit prima. Er is dan dus eigenlijk niets in dit geweldig grote gebied; men spreekt wel van ‘de Grote Woestijn’. Om de een of andere reden zou dus onze huidige generatie natuurkundigen ‘geraden’ hebben hoe de natuur eruitziet over een gebied dat even groot is als alle voorafgaande natuurkunde bij elkaar. We hebben geraden dat er ‘niets’ is. Wie dat gelooft mag het zeggen.

Nee, de meeste natuurkundigen denken aan andere scenario's; ze denken dat er bloemetjes bloeien in de woestijn. Maar hoe kunnen deze eruitzien? Het enige aanknopingspunt dat we hebben is het fijnregelingsprobleem. Zouden we een scenario kunnen bedenken, een *mogelijk* model dat desnoods slechts een gedeelte van dit gebied beschrijft, zonder dat iemand de knoppen met grote precisie heeft moeten afstellen?

De gemakkelijkste manier om dit te doen is te zoeken naar een *symmetrie*. De knoppen staan afgesteld op een manier die symmetrisch is. De symmetrie die hiervoor het meest in aanmerking komt heet ‘supersymmetrie’. Bruno Zumino, Julius Wess, Peter van Nieuwenhuizen, Sergio Ferrara en vele anderen zijn hiervan de pioniers. Wat is supersymmetrie?

U hebt gezien dat in het standaardmodel (maar ook in eerdere modellen) de deeltjessoorten in multipletten worden gerangschikt. Alle deeltjes in één multiplet hebben altijd dezelfde



Figuur 22. De snelweg door de Grote Woestijn. De getrokken lijnen onderin, tot ca 100 GeV (100 giga-elektron Volt) zijn de massawaarden van de bekende deeltjes. Bij hogere energieën, die corresponderen met nog kleinere lengteschalen, is de natuur ons nog onbekend. We vermoeden dat een 'Grote Unificatie Theorie' (GUT) kan gaan gelden even voordat de Planckenergie wordt bereikt, bij ca 10^{19} GeV.

spin. Geen wonder: de gebruiksaanwijzingen voor spin 1, spin ½ en spin 0 lijken heel erg verschillend te zijn van elkaar. Symmetrie tussen verschillende spin lijkt geheel afwezig. Met name de deeltjes met halftallige spin, de fermionen, voldoen aan het uit-

sluitingsprincipe van Pauli, terwijl die met heeltallige spin, de bosonen, daarentegen juist collectief gedrag vertonen (ze zitten graag met z'n allen in dezelfde plaats- of bewegingstoestand). Daarom mag het verbazend heten dat men toch een wiskundig schema heeft gevonden waarmee men fermionen en bosonen bij elkaar in één multiplet kon zetten. De verschillen tussen die deeltjes bleken slechts te zitten in onze beschrijving ervan; in dit schema zijn ze identiek.

De regels voor deze ‘supermultipletten’ zijn heel strikt. Ieder supermultiplet bevat evenveel fermionen als bosonen. De oorspronkelijke (naakte) massa's van alle deeltjes in een multiplet zijn dezelfde. Het eenvoudigste geval noemen we N = 1-supersymmetrie. Daar mogen de leden van een supermultiplet slechts een halve spineenheid van elkaar verschillen. We hebben ook N = 2- en N = 4-supersymmetrie, met nog grotere supermultipletten. Het zou wat te ver voeren om hier te proberen uiteen te zetten wat N nu precies voorstelt (ruwweg: het aantal halve spinstapjes in een supermultiplet).

Nu is het zo dat in de natuur (en met name het standaardmodel) de massa's van de fermionen helemaal niet dezelfde zijn als die van de bosonen. Erger nog, het blijkt dat geen enkel ons bekend fermion bij één van de ons bekende bosonen in een supermultiplet past. Als supersymmetrie ook maar een heel klein beetje goed is dan zouden we in de wat verdere toekomst bij alle ons bekende deeltjes ‘superpartners’ moeten vinden. Kennelijk hebben al deze nog te ontdekken deeltjes een massa die zo groot is dat ze (nog?) niet in machines konden worden gemaakt.

De superpartners van het foton, de W, de Z, het gluon en het Higgs moeten alle spin ½ hebben. Men noemt ze ‘fotino’, ‘Wino’, ‘Zino’, ‘gluino’ en ‘Higgsino’, aansluitend op het woord ‘neutrino’ (hoewel ze daar eigenlijk weinig mee te maken hebben). De superpartners van de quarks en leptonen (‘squarks’ en ‘sleptonen’) hebben spin nul.

De massaverschillen tussen de superpartners in een supermultiplet moeten op z'n minst vele duizenden MeV's bedragen. Dat betekent dat supersymmetrie niet exact goed kan zijn, maar is ‘gebroken’. De mate waarin supersymmetrie gebroken is lijkt voor ons heel groot, maar voor een Gulliver die in een gebied rondwandelt waar met miljoenen MeV's wordt gehandeld, is deze breking misschien wel verwaarloosbaar. Het zou dus kunnen zijn dat daar supersymmetrie bij zeer goede benadering geldig is.

Natuurlijk zou je in zo'n theorie ook moeten aangeven waardoor en hoe de supersymmetrie verbroken wordt. Het blijkt heel moeilijk te zijn een aannemelijk mechanisme hiervoor te bedenken. Je zou geneigd zijn te denken aan een of ander condensatieproces, analoog aan het Higgsmechanisme, dat immers een massa gegeven heeft aan de *W* en de *Z*, en dat ook verantwoordelijk is voor de massaverschillen tussen het elektron en diens neutrino, of het muon en diens neutrino.

Het Higgsmechanisme is uiteindelijk verantwoordelijk voor alle massa's in het standaardmodel. Waarom niet ook voor de massaverschillen in de supermultipletten? Zoals al eerder in dit boek moet ik aanvoeren dat een theorie niet alleen uit woorden maar ook uit nauwkeurige, wiskundige rekenregels moet bestaan. En dan blijkt dat het idee van de ‘spontane supersymmetriebreking’ niet goed genoeg is om de verstoring van de supersymmetrie te verklaren. Je zou bijvoorbeeld een strikt massaloos deeltje met spin ½ verwachten, het ‘Goldstino’. Zou dat niet één van de neutrino's kunnen zijn? Daniel Freedman en mijn studiegenoot, nu collega, Bernard de Wit hebben aangetoond dat de ons bekende eigenschappen van het neutrino hiermee niet te verenigen zijn. Het moet dus anders, en hoe precies weten we niet. Dit is een wat teer punt in de supersymmetrietheorie.

Als je eenmaal (benaderde) supersymmetrie hebt, dan heb je weliswaar het aantal deeltjessoorten in de natuur verdubbeld,

maar dan is er ook geen fijnregelingsprobleem meer. Een paar bloemetjes in de woestijn slechts, en verder een supersnelweg die je naar de andere kant voert.

Een bijzonderheid in de supersymmetrietheorie is dat ook de overbrenger van de zwaartekracht, het graviton, een superpartner moet hebben. Dit wordt het ‘gravitino’ genoemd. Het gravitino is dan het enige fundamentele deeltje dat spin 3/2 heeft (de deltaresonantie, Δ, heeft ook spin 3/2, maar deze is samengesteld uit quarks, die spin ½ hebben). Gravitino's zouden uiterst moeilijk zijn waar te nemen.

Over de theorie die je krijgt als je supersymmetrie met de zwaartekracht combineert straks meer.

22 Technicolor

Ook een vlo
wordt door kleine vlootjes gebeten,
en ze vormen zo
een oneindige keten.

Supersymmetrie is wiskundig heel mooi, en daarom staat de vakliteratuur er bol van. Zoals we ook eerder ervaren hebben, bijvoorbeeld bij het opstellen van de Yang-Millstheorie, hebben we dus een prachtig wiskundig schema, waarvan we alleen niet weten hoe het in ons stelsel van natuurwetten zou moeten worden ingepast. Het een en ander klopt nog niet, maar, zo zou je kunnen hopen, dat komt later wel.

Er is nog een heel ander scenario, dat eigenlijk veel meer tot de verbeelding spreekt. We hebben gezien dat atomen uit kleinere bouwsteentjes bestaan, de protonen, neutronen en elektronen. En daarna hebben we ontdekt dat de eerste twee daarvan ook weer een verdere substructuur hebben: ze bestaan uit quarks en gluonen. Waarom, zo zult u misschien al gedacht hebben, gaat dat niet zo door? Misschien zijn die quarks en gluonen, en ook de elektronen en alle andere deeltjes die in het standaardmodel ‘elementair’ worden genoemd, uiteindelijk ook weer opgebouwd uit nog kleinere legoblokjes?

U zou niet de eerste zijn met deze gedachte. Ik vertelde al hoe Jonathan Swift de wereld van het kleinere zag als een kopie van de wereld van het grote. Grote vlooien hebben kleine vlootjes op hun huid, enzovoorts, tot in het oneindige. Wel, zoals de bioloog u zou vertellen dat je de wereld van de vlooien toch een beetje genuanceerder moet zien, zo moet ik u ook zeggen dat het beeld van een repeterende reeks van bouwstenen voor elementaire deeltjes niet zonder meer juist kan zijn.

Laten we eens kijken naar die quarks in een proton. De quan-

tummechanica, die schitterende theorie die met ongelofelijke precisie hier overal de dienst uitmaakt, eist dat de kleinst mogelijke ‘impuls’ van een deeltje, dat wil zeggen het product van massa en snelheid, omgekeerd evenredig is met de afmetingen van het doosje waarin je het opbergt. Nu is het proton waar de quarks in zitten zo klein dat de snelheid waarmee de quarks daarin rondtollen daardoor heel dicht bij de lichtsnelheid komt. Daardoor wordt de massa van de twee lichtste quarks, *u* en *d*, veel groter dan de getallen in tabel 7, en wel ongeveer 300 MeV, zodat het proton een massa rond de 900 MeV heeft, veel meer dus dan de rustmassa's van de quarks (en gluonen) die erin zitten.

In tegenstelling tot het proton lijken nu de quarks zelf, evenals de leptonen en alle andere deeltjes in het standaardmodel, ‘puntvormig’ te zijn. Daarmee bedoelen we dat ze steeds onveranderlijk blijven zelfs als hun energie zo groot is dat je ze in een doosje zou kunnen doen dat duizendmaal zo klein is als een proton. En nu dus de moeilijkheid: stel dat ze uit andere deeltjes waren samengesteld. Die moeten dan wel héél dicht op elkaar zijn samengepakt. Dus zouden die deeltjes een zeer grote bewegingsenergie, dus massa, moeten hebben. Waarom zijn de quarks en elektronen dan zo licht?

Je kunt het nog ingewikkelder zeggen. De quarks in het proton hebben drie soorten ‘massa’. Ten eerste de ‘vrije massa’, maar omdat het oneindig veel energie kost om een quark vrij te krijgen uit het proton is die vrije massa oneindig. Dat is dus hier een betekenisloos en daardoor onbruikbaar begrip. Ten tweede de massa die de quark in het proton aanneemt omdat hij volgens de quantummechanica in beweging moet blijven. Deze ‘bouwsteenmassa’ is ongeveer een derde van de massa van het proton, dus 300 MeV. Ten derde de ‘naakte’ ofwel oorspronkelijke massa. Deze bepaalt de gedragingen van de quark op nog kleinere schaal. Dat is de massa die in de bewegingsvergelijkingen voor de quarks voorkomt, en voor de *u*- en de *d*-quarks bedraagt deze

slechts enkele MeV's. Ons probleem is nu dat onze hypothetische hyperbouwstenen een uiterst grote bouwsteenmassa zouden moeten hebben, althans vele malen groter dan de massa van het opgebouwde object. Alsof je gevraagd wordt van loodzware stalen balken een hyperlichte racefiets te bouwen.

Er is één lichtpuntje: de natuur heeft ons een voorbeeld gegeven van hoe zoiets kan. Het pion namelijk bestaat ook uit quarks. Het pion is niet veel groter dan het proton, en de bouwsteenmassa van de quarks erin zou dus ook ongeveer 300 MeV moeten bedragen. In plaats van 600 MeV is het pion echter slechts 135 MeV zwaar. Dit komt omdat de massa van het pion door een symmetrie wordt geregeerd: het pion is een Goldstoneboson (zie hoofdstuk 12).

Dit betekent dat er misschien een manier bestaat om deeltjes die zelf zo licht zijn als het elektron, niettemin toch opgebouwd te denken uit ‘zwaardere’ bouwstenen. Je moet symmetrieën invoeren, misschien wel evenveel als er deeltjes zijn in het standaardmodel. Dan namelijk zou je kunnen stellen dat alle thans bekende deeltjes zo licht zijn als ze zijn omdat hun massa's ‘beschermd’ worden door een symmetrie. Het blijkt een heel ingewikkelde opgave te zijn dit idee tot een nauwkeurig wiskundig voorschrift te verheffen.

Wat uitvoerig geprobeerd is, is voortborduren op het thema ‘kleuropsluiting’. De kleurkrachten hielden de quarks zo mooi bij elkaar in het proton en het pion. Misschien bestaat er een nieuwe versie van zo'n kleurtheorie, op een duizendmaal kleinere afstandsschaal als de oude kleurtheorie, die bouwstenen bij elkaar houdt in wat we nu nog elementaire deeltjes noemen. Er zijn versies van deze theorie die niet helemaal onmogelijk lijken. Men heeft theorieën van dit soort ‘technicolor’ genoemd: een kleur die duizendmaal ‘krachtiger’ is dan die uit de quantumchromodynamica.

Ik heb zelf wel eens opgemerkt dat je de quarks moet zien als de ‘vierde bouwstenen’ (moleculen bestaan uit atomen; atomen

uit subnucleaire deeltjes; subnucleaire deeltjes uit quarks). Als quarks voor de vijfde maal uit bouwstenen bestaan, moet je deze laatste ‘quinks’ noemen. Dat laat de mogelijkheid open om later over ‘sexks’, ‘septemks’, enzovoort te gaan praten. Ik heb het niet zo begrepen op het gebruik van superlatieven zoals ‘super-’ en ‘hyper-’, waarmee men dikwijls iets nieuws aanduidt (denk aan ‘supernova’, ‘supergeleiding’, ‘supersymmetrie’, enzovoort). Terwijl serieuze onderzoekers met zo'n naamkeuze hun laatste kruit verschieten doen ze mij denken aan de aan lager wal geraakte zakenlui Super en Hieper van Marten Toonder. Helaas heeft men mijn benaming ‘quinks’ niet overgenomen. Het woord ‘preons’ leest men vaker.

Er zitten verscheidene moeilijkheden in de technicolortheorie. Het zou bijvoorbeeld voor de hand liggen als het elektron en het muon, die immers als twee druppels water op elkaar lijken, uit dezelfde bouwstenen zijn opgebouwd. Maar dan zou het mogelijk moeten zijn dat het muon in een elektron overgaat onder uitzending van een foton. De gewone hadronen in de gewone kleurtheorie maken zulke overgangen op een manier die met de berekeningen klopt. Maar het muon vervalt nooit in een elektron en een foton. Er komen altijd neutrino's bij te pas.

Het belangrijkste wat zo'n theorie moet doen is de bouwstenen vinden van het Higgsdeeltje. Dit is het deeltje dat de grootste problemen geeft met de fijnregeling. In het standaardmodel konden we de interacties tussen het Higgsdeeltje en de andere deeltjes zodanig kiezen dat alle massa's van die deeltjes daardoor worden gegenereerd. Onze theorie zou nu deze interacties moeten ‘voorspellen’, en helaas, die voorspellingen komen er zelfs niet bij benadering goed uit. Er zijn weer nieuwe ijktheorieën nodig om deze interacties te genereren, en zo kwam men tot de ‘uitgebreide technicolortheorie’. En dan is het weer oppassen dat de theorie niet te veel interacties genereert. Zo zijn er vele versies afgekeurd omdat ze de bijzondere eigenschappen van de kaonen (zie hoofdstuk 7) zouden verstoren.

Ik heb zelf regels ontdekt waar men zich aan houden moet bij het opstellen van de symmetriepatronen in een technicolortheorie, gebruikmakend van de al eerder genoemde anomalieën. Dat werk heeft ertoe bijgedragen dat men geneigd is het hele idee naar het rijk der fabelen te verwijzen omdat het bijna onmogelijk is aan deze regels te gehoorzamen en toch een geloofwaardig model op te stellen. Maar het zou nog kunnen zijn dat onze wereld door een zo ingewikkeld schema van technicolorkrachten geregeerd wordt dat we het nu niet raden kunnen. Als een nieuwe generatie versnellers, zoals de Europese 'Large Hadron Collider' rond 2006 in gebruik zal worden genomen, zal deze zeker iets van zulke nieuwe krachten moeten onthullen. (Helaas heeft het Amerikaanse Congress besloten dat hun ambitieuze 'Superconducting Supercollider' (geen commentaar over de naam) niet zal worden voltooid, wegens te hoge kosten. Een lelijke tegenslag voor de deeltjesfysica.)

Nadat de eerste druk van dit boekje verscheen, werden de aanwijzingen ten gunste van supersymmetrie allengs sterker, terwijl 'technicolor' thans vrijwel geen aandacht meer krijgt.

Overigens zijn er ook ideeën om supersymmetrie met technicolor te combineren. Wat voor de sterrenkundigen weer interessant is, is dat dit soort theorieën niet alleen een waterval van nieuwe superzware deeltjes in het vooruitzicht stelt, maar ook diverse zeer zwak reagerende lichtere deeltjes, de 'technipionen'. Dit is het soort 'ZIZO'-deeltjes waarmee de ruimte tussen de melkwegstelsels gevuld zou kunnen zijn; zij zouden de ontbrekende massa kunnen opleveren waarnaar de astronomen nog steeds op zoek zijn.

23 De grote unificatie

Toen Paul Dirac in 1931 uit zijn vergelijking voor het elektron voorspelde dat er een antideeltje moest bestaan met dezelfde massa maar tegenovergestelde lading, bracht dit hem in grote verlegenheid. Zo'n deeltje was nog niet ontdekt en met zo'n revolutionair voorstel wou hij eigenlijk de wetenschappelijke wereld niet lastigvallen. ‘Misschien is dat rare positief geladen deeltje in mijn theorie niets anders dan het proton,’ had hij gesuggereerd. Hij was zo verrast toen het echte antideeltje van het elektron (het positron) korte tijd later inderdaad werd ontdekt, dat hij uitriep: ‘Mijn vergelijking is slimmer dan de ontdekker ervan!’

Tegenwoordig hebben de fysici heel weinig last van zo veel bescheidenheid. Ja, er wordt zelfs gezegd dat het ons in de bol is geslagen. Toen de nieuwe ijktheorie voor de zwakke kracht in 1972 populair werd, hadden Weinberg en Salam niet de minste moeite deze te adverteren als een ‘unificatie’ van de zwakke kracht met de elektromagnetische kracht, en wel ‘de belangrijkste unificatie sinds sir James Clark Maxwell de wetten voor de elektriciteit met die van het magnetisme verenigde’.

Ik heb altijd gesteld dat voor het model van Weinberg en Salam die mooie woorden maar ten dele gerechtvaardigd zijn. Je ging in de nieuwe theorie immers nog steeds uit van twee verschillende ijkvelden, die we aanduiden met de formules ‘$SU(2)$’ en ‘$U(1)$’. Dat is geen unificatie. Aan de andere kant kun je stellen dat die twee ijktheorieën beide op precies dezelfde wiskundige principes berusten. Dat was in de vroegere formuleringen veel minder het geval. In die zin was er dus wel sprake van unificatie.

‘Unificatie’ werd een lokkend toverwoord. Natuurkundigen hadden immers al heel lang gezocht naar die ene ‘geünificeerde veldentheorie’, die ene theorie die alles verklaart. ‘Unificatie’

was bijna, maar nog niet helemaal bereikt. Kan dit niet beter?

Als we de drie verschillende ijkveldsystemen - want we hebben ook nog de sterke kracht, *SU*(3) - zouden kunnen samensmeden tot één zo'n systeem, dan zou dat een aanzienlijke verbetering betekenen. Dan zou je namelijk maar één natuurconstante voor die kracht nodig hebben en niet drie zoals nu. In plaats van in totaal 26 onberekenbare constanten zou de nieuwe theorie er waarschijnlijk veel minder hebben.

Helaas, zo eenvoudig gaat dat niet. Die drie ijksystemen hebben alle een heel verschillende ijkconstante. De constante behorende bij de sterke kracht (formule *SU*(3)) is vele malen groter dan die voor de zwakke kracht, en die is weer groter dan de *U*(1)-constante. Als deze systemen uit één ijkveldensysteem voortvloeien, hadden deze drie getallen ongeveer even groot moeten zijn.

Maar laten we weer grijpen naar ons denkbeeldige vergrootglas. Aannemend dat het standaardmodel nog enigszins geldig blijft, kunnen we de sterkte van de krachten uitrekenen voor het geval dat de deeltjes uiterst dicht bij elkaar komen. U herinnert zich misschien (hoofdstuk 13) dat de sterke kracht dan een beetje minder sterk wordt. Dit geldt ook, maar in veel mindere mate, voor de *SU*(2)-kracht. De *U*(1)-kracht wordt juist sterker in plaats van zwakker.

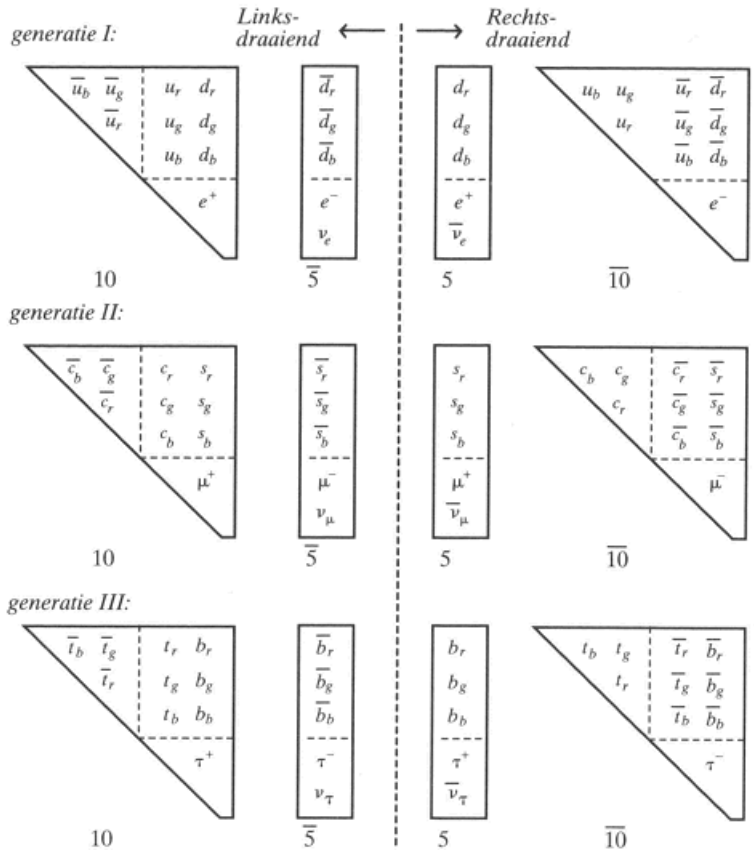
De verandering in de relatieve sterkte van de krachten is maar klein. Maar laten wij eens in een snelle auto de supersnelweg door de woestijn inslaan. We gaan van enkele duizenden MeV's naar het energiegebied van 10.000.000.000.000.000.000 ofwel 10^{19} MeV. Dat correspondeert met een lengteschaal van ongeveer 10^{-30} cm. Het was de ontdekking van Howard Georgi, Helen Quinn en Steven Weinberg dat dit het gebied is waar alle drie ijkkrachten ongeveer dezelfde sterkte krijgen. Is het toeval dat ze alledrie *tegelijk* dezelfde sterkte krijgen? Is het toeval dat dit gebeurt juist als we vrij dicht bij het einde van de snelweg zitten (nog maar drie nullen te gaan)?

Howard Georgi en Sheldon Glashow zochten uit hoe je in het energiegebied van 10^{19} GeV een écht geünificeerd model kon opschrijven zodanig dat, als je over de snelweg weer terugrijdt, de drie verschillende ijkkrachten er weer uit komen. En ze vonden zo'n model. Als we bereid zijn het eerder genoemde fijnregelingsprobleem weer even helemaal te vergeten, hebben we hier een fantastisch leuke theorie. De formule is '*SU*(5)'. Dit betekent dat de kleinste multipletten vijf leden bevatten. Maar je kunt ook multipletten hebben met tien deeltjes erin. In figuur 22 staan de multipletten voor de fermionen *en nu ook die van hun antideeltjes* op een nette manier gerangschikt. Een bijzonderheid in dit model is dat niet alleen deeltjes samen met antideeltjes in één multiplet kunnen staan, maar ook dat de *linksdraaiende* en *rechtsdraaiende* componenten van de deeltjes in verschillende soorten multipletten zijn gezet. Iedere generatie heeft multipletten die worden aangeduid met de symbolen 5,5, 10 en 10. Het multiplet met tien deeltjes erin is dezelfde rangschikking die je krijgt als je vraagt op hoeveel manieren je twee *verschillende* leden van een 5-plet bij elkaar kunt zetten. De 10 ontstaat op dezelfde manier uit de 5.

Er zijn nu nieuwe krachten die deeltjes kunnen veranderen in één van hun vriendjes in hetzelfde multiplet. Naast de reeds bekende ijkbosonen *W* en *Z* van de zwakke kracht en de gluonen van de sterke kracht stelt deze theorie voor dat er een nieuw ijkboson is, het *X*-boson, dat deze nieuwe overgangen veroorzaakt.

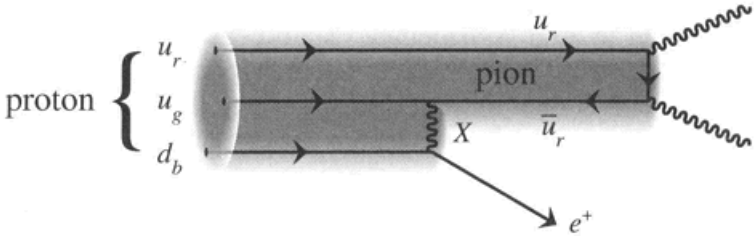
U ziet dat rechtsdraaiende neutrino's en linksdraaiende antineutrino's hier niet in voorkomen, maar je zou ze erbij kunnen zetten. Ze zitten dan echter eenzaam in drie *singletten*, met het gevolg dat geen van de ijkvelden op hen inwerken.

IJkkrachten waaraan we al gewend waren zijn die welke overgangen veroorzaken waarbij de deeltjes binnen de hokjes blijven die zijn aangeduid met een stippellijn. Georgi en Glashow voorspelden dat de nieuwe ijkdeeltjes, de *X*-bosonen,



Figuur 23. De multipletten in het SU(5)-model van Georgi en Glashow. De rechts- en linksdraaiende componenten van de deeltjes nemen verschillende plaatsen in. Strepen boven de deeltjes duiden de antideeltjes aan. De quarks hebben drie mogelijke kleuren, aangeduid met r (rood), g (groen) en b (blauw).

deeltjes zijn met een massa ergens in het 10^{19} MeV-gebied. Zij veroorzaken nu overgangen over de stippellijntjes heen. Het bijzondere daarbij is dat dan quarks in antiquarks kunnen overgaan. In figuur 24 staat een Feynmandiagram van wat er kan gebeuren als zo'n nieuw *X*-boson wordt uitgewisseld.



Figuur 24. Protonverval door uitwisseling van een X-boson. In dit diagram gebeurt dit door de successievelijke overgangen $u_r\, u_g\, d_b \rightarrow u_r\, X\bar{u}d_b \rightarrow u_r\, \bar{u}_r\, e^+$. Alle betrokken fermionen staan in het eerste 10-plet van figuur 23. Het X-boson verbindt de verschillende delen van dit multiplet. We zien dus het vervalp $\rightarrow \pi^o + e^+$. Het pion vervalt vervolgens in twee fotonen.

Een gevolg van dit model zou dus zijn dat het proton niet meer absoluut stabiel is maar in twee of meer lichtere deeltjes kan uiteenvallen. We hadden al gezien dat in het oudere standaardmodel protonen weliswaar ook kunnen vervallen (hoofdstuk 17), maar daar alleen met drie tegelijk, en dat verval is in ons huidige heelal zo zeldzaam dat het in dat gehele heelal waarschijnlijk nooit meer zal gebeuren. Ditmaal hebben we een vervalsproces voor afzonderlijke protonen, dat vaker plaats zal vinden.

Een goede theorie wordt gekenmerkt door het feit dat je er nauwkeurige berekeningen mee kunt doen. Ook in dit model kun je uitrekenen hoe lang het gemiddeld duurt voordat een gegeven proton uiteenvalt. Heel nauwkeurig kan dit niet omdat

de tijdsspanne enorm is: de voorspelling was 10^{29} tot 10^{30} jaar. De reden waarom het zo lang duurt voordat een overgang als geschetst in figuur 24 plaatsvindt, is niet moeilijk te raden. Het *X* is zo zwaar dat het een enorme hoeveelheid energie kost het aan te maken. Daardoor wordt de overgang uiterst onwaarschijnlijk. De kans is omgekeerd evenredig met de *vierde* macht van de massa van het *X*-deeltje.

Hoe kun je zo'n voorspelling experimenteel toetsen? Niemand heeft de tijd om 10^{30} jaar te wachten (ons heelal is 'slechts' 10^{10} jaar oud of daaromtrent). Maar als je nu 10^{30} protonen bij elkaar hebt dan mag je verwachten dat er gemiddeld verscheidene per jaar vervallen. In een stevig zwembad kunnen wel 10^{32} protonen. Tegenwoordig kan men meetapparatuur maken die zo gevoelig is dat het uiteenvallen van een enkel proton daarin gedetecteerd kan worden. Wel moet je dan zoveel mogelijk de kosmische stralen tegenhouden (dat zijn snel voortvliegende deeltjes die ons vanuit het heelal voortdurend bombarderen). Daarom doet men zulke experimenten het liefst enige kilometers onder de grond. Een apparaat waarin zulke metingen kunnen worden gedaan hebben we al gezien: Super-Kamiokande in Japan. In deze zeer grote en buitengewoon gevoelige detector kon men ook nagaan of er protonen in uiteenvallen.

Niettemin is er ook hier een grens tot waar men meten kan. Neutrino's die vanuit de ruimte komen, of door kosmische stralen in de atmosfeer worden gecreëerd, laten zich ook door kilometers aarde absoluut niet tegenhouden. Deze neutrino's kunnen in het water dan ineens een interactie veroorzaken die moeilijk te onderscheiden is van het gezochte protonverval. Maar dankzij de grote bekwaamheid van onze experimentatoren heeft men de grens van de levensduur van het proton tot omstreeks 10^{33} jaar kunnen brengen. We weten dus dat ieder proton gemiddeld langer leeft dan 10^{33} jaar. Dat is een ondergrens. Er is nog nooit met enige mate van zekerheid een uiteenvallend proton geregistreerd.

Er zijn takken van de wetenschap waar men wel raad weet met zulke kleine discrepanties. Je rekt de theorie gewoon een beetje uit. Maar hier gaat dat niet: het *SU*(5)-model van Georgi en Glashow ligt eruit. Wel kan men variaties op het thema bedenken die wat ingewikkelder zijn en (nog) niet in strijd met de experimentele gegevens, maar we krijgen toch het gevoel dat we op de verkeerde weg zitten. Het belangrijkste argument daarvoor komt nu uit de theorie zelf: het eerdergenoemde fijnregelingsprobleem.

In 'grootse geünificeerde theorieën' van het type *SU*(5) moeten op zijn minst twee verschillende soorten Higgsdeeltjes zitten. Het veld van één van deze deeltjes is zo sterk dat het massa's kan genereren zo groot als 10^{20} MeV, de massa van het *X*-boson. Van het andere Higgsdeeltje is het veld zo zwak dat de *W*- en *Z*-bosonen 'slechts' 80.000 en 90.000 MeV zwaar zijn. Het ene veld is dus zeker 10^{15} keer sterker dan het andere. Ons probleem is dat in onze theorieën de Higgsvelden geneigd zouden zijn elkaar te beïnvloeden. Hoe kan dan ooit het ene veld 10^{15} keer zo zwak blijven als het andere? Waar komt die enorm grote schaalverhouding vandaan? Ook hier zien sommigen een rol weggelegd voor supersymmetrie.

Verreweg het meest waarschijnlijke antwoord op deze vraag is supersymmetrie. Als je de grote massaverhoudingen in dit soort theorieën met supersymmetrie wilt beschermen, krijg je de *supergrootse geünificeerde theorieën*.

Omdat er nu zo veel superpartners in deze modellen rondlopen verandert er wel wat. Ten eerste blijkt dat de drie ijkkoppelingsconstanten pas wat verder weg bij elkaar komen, dus bij nog hogere energieën dan in de eerdergenoemde geünificeerde theorie. Wel, dat is goed nieuws, want hierdoor wordt het proton een stuk stabieler. Ten tweede bleek dat de drie constanten heel wat nauwkeuriger bijeenkomen dan in de vorige theorie; de berekeningen kloppen nu veel beter!

Ten derde vond men dat je de eerder genoemde wiskundige

groep *SU*(5) beter vervangen kunt door een structuur die daar nauw mee verwant is, maar *SO*(10) heet. In deze theorie worden de 5, de 10 en het eenzame verkeerd draaiende neutrino tot een enkel multiplet verheven van 16 componenten. We hebben dus voor iedere generatie precies een 16 en een 16, meer niet. Stel dat je vijf doosjes hebt waar precies een knikker in kan. 16 is het aantal manieren waarop je een even aantal knikkers in die vijf doosjes kunt doen.

Men rekende nu weer uit hoe lang de levensduur van het proton zal zijn. De berekeningen werden door Jogesh Pati gedaan, en hij komt op ongeveer 10^{34} jaar uit. Dat is slechts tienmaal langer dan wat men thans al meten kan! Dit is zeker reden genoeg om nog grotere detectoren te gaan bouwen. Abdus Salam heeft eens voorgesteld dat je zo'n detector op de maan moet zetten, enige kilometers onder de oppervlakte. De maan heeft namelijk geen atmosfeer, en daardoor kunnen de kosmische deeltjesprojectielen daar geen neutrino's maken. Er ontstaan weliswaar pionen, maar die krijgen de tijd niet om uiteen te vallen, die worden weer geabsorbeerd. Geen neutrinoachtergrond! Jammer alleen dat er misschien meer water voor dit experiment nodig is dan er op de hele maan is te vinden, dus de kosten zullen wel bedenkingen opleveren. Gelukkig kan de meting ook wel op aarde gebeuren, maar dan moet men met grote nauwkeurigheid de uiteenvallende protonen leren onderscheiden van al die neutrino-interacties. Het blijft gewoon een kwestie van geld.

24 Superzwaartekracht

De zwaartekracht is één van de merkwaardigste van alle krachten die op onze deeltjes kunnen inwerken. U herinnert zich dat we bij het begin van onze tocht naar de wereld van het kleine opmerkten dat voor kleinere wezentjes de zwaartekracht veel minder belangrijk is dan voor grote wezens. Een muis kan een bijna loodrechte wand beklimmen maar een olifant niet. Voor atomen en moleculen en ook alle deeltjes die ik tot nu toe besproken heb, is de zwaartekracht een praktisch verwaarloosbaar verschijnsel. Maar wanneer we kijken naar deeltjes die kleiner zijn dan de afmetingen van een atoomkern dan vindt er een omkering plaats. De zwaartekracht namelijk grijpt aan op de *massa* van de deeltjes, terwijl alle andere krachten aangrijpen op iets wat we *lading* noemen. Het verschil hiertussen is dat de lading niet of nauwelijks afhangt van de vergrotingsfactor van onze microscoop, terwijl *massa* samenhangt met *energie*, en als we een deeltje in een kleinere ruimte willen lokaliseren, zal er volgens de quantummechanica meer beweging optreden; de bewegingsenergie neemt toe. Daarom corresponderen kleinere afstanden met grotere energieën, en dus ook met grotere massa's. Op afstandsschalen die veel kleiner zijn dan de afmetingen van het proton zullen de effecten van de zwaartekracht waarmee de deeltjes elkaar aantrekken weer relatief belangrijker worden, of zeg maar liever: minder onbelangrijk!

We gaan weer heel ver de Grote Woestijn in, naar een gebied van de deeltjesfysica waar de energie (per deeltje) veel groter is dan waar we directe experimentele gegevens over hebben. Ik geef het toe, we weten nog niet veel over de Grote Woestijn. Zoals gezegd, dit is terrein van speculatie. We nemen aan dat de grondregels van de deeltjesfysica geldig blijven. Er is dan echter één ding dat dan heel duidelijk wordt: er komt een eind aan dit gebied. Je kunt namelijk uitrekenen wanneer het gebeurt dat de

zwaartekracht alle andere krachten gaat overtreffen. Dat is waar de woestijn wel moet ophouden. Ik heb al aangegeven waar die grens is: als de massa's groter worden dan 10^{19} protonmassa's, en dat correspondeert met verschijnselen die structuren hebben met afmetingen van 10^{-33} cm. We noemen de corresponderende afstandsschaal de *Plancklengte* en de massa de *Planckmassa*. Je kunt de Planckmassa ook in grammen uitdrukken: 21 microgram, ofwel de massa van een wat klein uitgevallen suikerkorreltje (en dat is dan ook het enige Planckgetal dat een beetje redelijk lijkt). Deze getallen betekenen dus dat als je de positie van een deeltje met een nauwkeurigheid van één Plancklengte probeert te bepalen, de massa ervan ten gevolge van zijn bewegingen zo groot wordt als de Planckmassa. En het effect van de zwaartekracht tussen dit soort deeltjes wordt dan sterker dan iedere andere kracht die erop werkt.

En als de zwaartekracht een sterke kracht wordt, is dat iets verschrikkelijks. Je kunt niet volstaan met de verzuchting dat dan de zwaartekracht net zo moeilijk te hanteren is als de quantumchromodynamica zoals die op quarks inwerkt. Want hier is de situatie veel ernstiger. Als je nóg kleinere structuren zou willen bestuderen dan zou de zwaartekracht daar zo sterk worden dat zelfs iedere poging een ruwe schatting te doen van wat deze kracht daar teweegbrengt onzinnige uitkomsten zal geven.

Alles wat we nu denken te weten over de natuur lijkt ongeldig te worden. We dachten het zo precies te weten. Einsteins theorie voor de aard van de zwaartekracht werkt uiterst nauwkeurig. Deze gaat uit van een fundamenteel principe, en dat principe moet haast wel juist zijn: zwaartekracht is een eigenschap van de ruimte en de tijd zelf. Ruimte en tijd zijn ‘gekromd’. Met kromming bedoel ik precies datgene wat er gebeurt met een vel mooi tekenpapier als het nat is geworden: het gaat bobbelen. Gladstrijken lukt niet meer. Zwaartekracht is toe te schrijven aan zulke bobbels in de ruimte en de tijd.

Hoe dichter we bij de Plancklengte komen, hoe meer we ge-

noodzaakt worden ook de wetten van de quantummechanica op dit bobbelen van ruimte en tijd toe te passen. Zolang de bobbeltjes heel bescheiden zijn lukt dit nog wel. We krijgen dan een theorie die we de *quantumzwaartekracht* noemen. Uit deze theorie volgt dan het bestaan van gravitonen, elementaire deeltjes met spin twee en massa nul.

Hoe dichter we bij de Plancklengte komen, hoe bobbeliger de ruimte wordt. Er komt een typisch quantummechanische onzekerheid in de kromming. Proberen we de Plancklengte te passeren dan gaat het dus helemaal fout. De kromming (en ook de onzekerheid erin) wordt zo groot dat je het begrip ‘afstand tussen twee punten’ niet meer hanteren kunt omdat geen enkele meetliniaal meer in zo'n ruimte past. Ruimte en tijd zijn dan zelf ook onhanteerbare begrippen geworden. De definitie van wat ‘ruimte’ en ‘tijd’ wiskundig betekenen hangt namelijk nauw samen met de definitie van ‘afstand tussen twee punten’. Dit alles gaat betekenen dat we de hele natuurkunde op zijn kop moeten zetten als we een bruikbare beschrijving willen vinden van deze Planckwereld.

De laatste halte vóór dit punt heet ‘superzwaartekracht’, een ingewikkelde wiskundige constructie die supersymmetrie en zwaartekracht combineert. Weer schep ik er behagen in te trachten in eenvoudige woorden uiteen te zetten waar ik het over heb. Wat is superzwaartekracht?

In hoofdstuk 21 noemde ik de ‘supermultipletten’. Deeltjes met spin nul of spin één werden in één multiplet gestopt met deeltjes met spin ½. Je hebt dan ‘supersymmetrie’. Je kunt je nu afvragen of er een theorie bestaat waarin een soort ijkdeeltjes voorkomen die overgangen bewerkstelligen tussen deeltjes en hun superpartners. Superijkfotonen dus.

Zo'n theorie bestaat, al is zij, zoals gezegd, nogal ingewikkeld. Want als een superijkfoton een deeltje met spin verandert in een deeltje met een andere spinwaarde dan betekent dat dat zijn eigenschappen in de ruimte en tijd daardoor veranderen, in

plaats van ‘inwendige’ eigenschappen zoals lading of vreemdheid. Heel veel natuurkundigen in verschillende landen hebben aan dit idee gewerkt, maar het was zo moeilijk dat ze er samen vele jaren voor nodig hadden om een sluitende formulering te vinden. Ik doe hun werk dus niet veel recht als ik hun conclusie in een paar regels samenvat: niet alleen de spin van het deeltje verspringt als er een superijkveld op werkt, maar het deeltje wordt ook een klein beetje verplaatst. Verplaatsen nu is ook precies wat een ‘ijktransformatie’ in de theorie van de zwaartekracht doet. Andere krachten zoals de elektrische kracht verplaatsen de deeltjes niet, zij beïnvloeden slechts hun golffunctie zodanig dat ze hun weg in een iets andere richting vervolgen.

Een gevolg van dit alles is dat een superijktheorie alleen maar geconstrueerd kan worden als men deze combineert met de zwaartekracht. Daarom noemen we deze theorie *superzwaartekracht*. Het superijkdeeltje is een deeltje met spin 3/2, *gravitino* genaamd. Het is de superpartner van het graviton.

In ‘$N = 2$’ en ‘$N = 4$’ superzwaartekracht hebben we twee, respectievelijk vier gravitinosoorten, die samen met spin-1-ijkfotonen een supermultiplet vormen. Er bestaat ook een ‘$N = 8$’ versie, de ingewikkeldste en daarom misschien de interessantste superzwaartekrachttheorie. Hier vormen alle mogelijke deeltjes één groot supermultiplet. In $N = 8$-superzwaartekracht zou ieder supermultiplet alle spinwaarden van nul tot en met twee moeten bevatten. Om precies te zijn: als je het impulsmoment (spin) ten opzichte van een vaste draaias in de ruimte beschouwt, moet deze in acht stapjes kunnen verspringen van -2 tot +2. Maar omdat er maar één soort graviton mag zijn (in Einsteins theorie is maar één soort zwaartekracht toegestaan) mogen we maar één supermultiplet hebben.

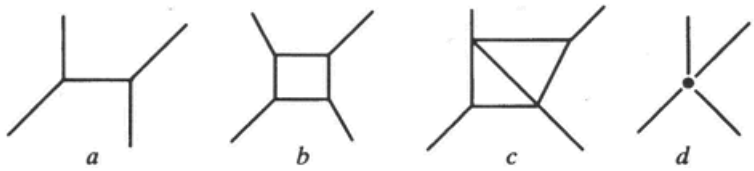
Het aantrekkelijke van deze theorie is dat er verder geen deeltjes zijn toegestaan, en dat het ene supermultiplet zo veel deeltjessoorten bevat dat we misschien wel alle bestaande deeltjes erin kunnen onderbrengen. Daarmee is dit dan een voor-

beeld van zo'n theorie die geen verdere uitbreiding of toevoeging duldt. Omstreeks 1980 brak er een groot enthousiasme uit voor deze constructie. Stel dat zij goed is, is de natuurkunde dan klaar? Hebben we dan de alomvattende theorie waar alle andere deeltjes en krachten uit af te leiden moeten zijn?

Ik ga even twintig jaar terug in de tijd. In het begin van de jaren zestig was Richard Feynman één der eersten die probeerde de quantumzwaartekracht op te zetten. Feynman ontdekte de ‘spookdeeltjes’, deeltjes die niet echt bestaan maar wel in tussentijdse uitdrukkingen lijken voor te komen als men de effecten van multipele deeltjesuitwisseling wil uitrekenen. Dit pionierswerk werd door de Amerikanen Bryce De Witt en Stanley Mandelstam, en de Russen Ludwig Faddeev, Victor Popov, Efim Fradkin, Andrei Slavnov en vele anderen voortgezet. Feynmans spookdeeltjes behoren thans tot de standaarduitrusting in alle deeltjestheorieën.

Toen Veltman en ik in 1972 precies wisten hoe de Yang-Millstheorie gerenormeerd moest worden, gingen wij ons ook met die zwaartekracht bemoeien. Wat wij ontdekten was dat de eerste effecten van meervoudige deeltjesuitwisseling (diagrammen met één gesloten lus erin, zie figuur 25b) geheel berekenbaar zijn, als je tenminste alleen gravitonen bekijkt. Als je andere deeltjessoorten invoert of kijkt naar ingewikkeldere diagrammen waarin de uitgewisselde deeltjes twee of meer gesloten lussen vormen (figuur 25c) treffen we de eerste voorboden van moeilijkheden: steeds weer nieuwe oneindige krachten moeten worden ingevoerd om de eindresultaten van de berekeningen eindig, ofwel zinvol te houden. Hierdoor noemen we de theorie *onrenormeerbaar*.

Hoe zit het nu met de superzwaartekracht? Hier ziet de zaak er in eerste instantie veel rooskleuriger uit. De symmetrie is zo groot dat vele van de krachten die eerst oneindig waren nu elkaar netjes in toom houden. Tot aan drie gesloten lussen leek er niets aan de hand, en enthousiastelingen riepen al uit dat dat



Figuur 25. a) eenvoudigste deeltjesuitwisselingsproces. In dit soort diagrammen is het effect van de quantummechanica nog minimaal. b) meervoudige uitwisseling met één gesloten lus. c) diagram met twee lussen. In de zwaartekrachttheorie zou het effect van deze uitwisseling alleen eindig zijn als men een nieuwe interactie van het type d) invoert. Maar substitueren we dit weer in een der vertices van b) en c) dan treden er steeds weer ergere complicaties op.

geen toeval kon zijn en dat de theorie voor alle krachten in aantocht was.

Een theorie voor alle krachten, is zoiets nu denkbaar? Kan het zijn dat een exacte formulering van de natuurwetten mogelijk is en is het denkbaar dat wij natuurkundigen daar ooit achter zullen komen? Sommigen menen dat zo'n ‘Theory of Everything’ (‘Theorie van Alles’) in aantocht is. Andere fysici noemen die gedachte alleen al het summum van arrogantie. Op dit thema zullen we nog terugkomen. Laat ik eerst eens preciseren op welke overwegingen deze ogenschijnlijk absurde ‘arrogantie’ gebaseerd is.

U zou van mij kunnen verwachten dat ik Gulliver opnieuw zal volgen en verder zal reizen naar de wereld van het nog kleinere. Helaas, ik ben bang dat verder reizen onmogelijk is. *Ruimte en tijd houden op te bestaan*! Je kunt niet meer spreken van twee punten die zich nog dichter bij elkaar bevinden dan de Plancklengte, omdat de kromming, het bobbelen, van het tussenliggende gebied niet meer te meten is. Stephen Hawking heeft eens gesuggereerd dat ruimte en tijd zo gebobbeld zijn dat ze een soort schuim vormen. Deeltjes zijn als pantoffeldier-

tjes die in de zeepvliesjes rondzwemmen. Om van de ene naar de andere plaats te komen zijn er heel veel mogelijkheden. Maar zelfs dit beeld is nog te simpel: omdat je afstanden en ook afmetingen niet meer kunt bepalen, zouden de kleine belletjes niet meer te onderscheiden zijn van grote bellen.

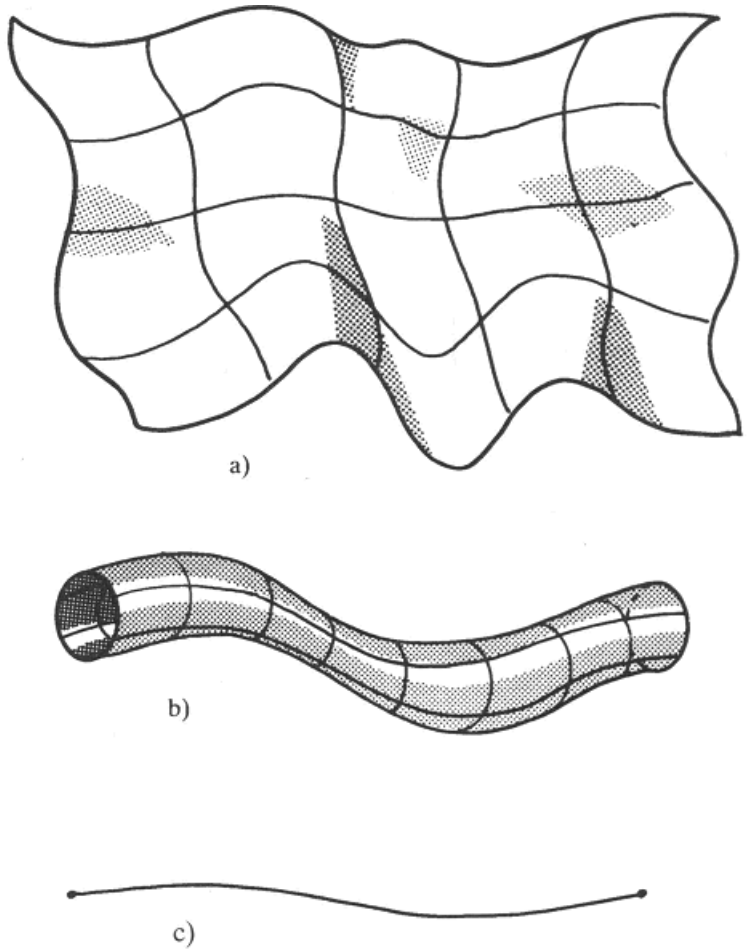
De meest radicale opvatting (waar de meeste natuurkundigen nog voor terugdeinzen) is dat ruimte en tijd slechts uit een losse verzameling punten bestaan; deeltjes kunnen zich alleen bevinden op die punten, maar niet ertussenin. Eigenlijk zou dit de meest logische opvatting zijn, want door de ‘quantumfluctuaties’ zouden alle punten waar zich deeltjes kunnen bevinden vanzelf minstens een Plancklengte van elkaar verwijderd blijven. Maar zo gemakkelijk komen we er ook niet vanaf, want hoe verklaren we dan dat die punten samenhangen om de ons bekende ruimte en tijd te vormen?

We hebben er nog geen idee van hoe dit soort vragen beantwoord zouden moeten worden. Maar waarom zou het onmogelijk zijn een wiskundig goed sluitende formulering van *alle* natuurwetten te vinden? Dit lijkt me een uitdaging die de mensheid misschien nog vele generaties zal kunnen bezighouden, maar waarom zouden we het antwoord nooit kunnen vinden? Misschien vergissen we ons, maar het lijkt er een beetje op dat de natuur is opgebouwd uit een soort legoblokjes ter grootte van de Plancklengte. Er is geen continuüm meer. Misschien passen de spelregels voor deze legoblokjes wel in een natuurkundeboek. En dat zou dan de Uiteindelijke Universele Theorie zijn waarop ik in het begin van dit boek doelde. Als zo'n theorie bestaat, dan zullen we hem vinden ook, al zal dat nog wel even duren. Dit is de Theorie van Alle Krachten waar natuurkundigen op azen, dikwijls om heel verschillende intuïtieve redenen.

25 Elf dimensies

We gaan weer even terug naar de voorlaatste halte, de superzwaartekracht. De theorie van de superzwaartekracht werkte mooi maar helaas toch nog niet mooi genoeg. Hier en daar werkte de wiskundige constructie niet perfect. Ook leken niet alle deeltjes tegelijk in zo'n model in te passen te zijn, en niet alle divergenties vielen tegen elkaar weg. Voor niets en niemand bang, waagden de onderzoekers het deze zelfde theorieën uit te proberen in ruimtes met veel meer dimensies dan de onze.

Een ruimte met twee dimensies kunt u vergelijken met het oppervlak van een vel papier, zoals de bladzijde die u nu aan het lezen bent. Stel dat u die nu uitscheurt en oprolt tot een pijpje. Voor dat kleine rode spinnetje dat er toevallig liep, maakt dit weinig verschil. Zijn wereld heeft nog steeds twee dimensies. Het duurt een hele tijd voordat hij is rondgelopen en hij merkt daar niets van. Maar van een grote afstand gezien is het pijpje net een stokje, dat maar één dimensie heeft. En zo kan ook de wereld van de allerkleinste deeltjes *meer dan drie* ruimtelijke dimensies hebben. De allerkleinste deeltjes zijn dan als ons rode spinnetje. Zij merken niet dat sommige dimensies ‘opgerold’ zijn. Voor ons zijn de opgerolde dimensies onzichtbaar geworden. Dit idee werd al in 1919 door Theodor Kaluza geopperd en in 1926 verder uitgewerkt door Oskar Klein. En zij ontdekten nog iets. De component van het zwaartekrachtsveld in de richting waarin de ruimte is opgerold, gehoorzaamt precies aan Maxwells wetten voor het elektromagnetische veld! Is elektromagnetisme dan niets anders dan zwaartekracht in een opgerolde dimensie? Einstein was enthousiast toen hij hiervan hoorde, maar men realiseerde zich al gauw dat je niets kon voorspellen met zo'n theorie, en zij verdween weer in de ijskast.



Figuur 26. a) Gekromde ruimte. Twee dimensies zijn afgebeeld.
b) Tweedimensionale ruimte, waarvan één dimensie is opgerold.
c) Eéndimensionale ruimte.

De onderzoekers van de superzwaartekracht herontdekten dit idee van Kaluza en Klein. Als er vele extra dimensies zijn, kom je in een walhalla van de wiskunde terecht. Dat oprollen namelijk kan op allerlei manieren. De componenten van de zwaartekracht in de diverse opgerolde richtingen werken nu als diverse soorten ijkvelden. We krijgen dan, bijna gratis, niet alleen elektromagnetisme maar ook andere ijkkrachten.

Het magische getal werd elf dimensies. Drie ervan vormen de gewone ruimte en één is de tijd. De zeven overige zijn opgerold. Elf is het *maximale* aantal dimensies dat een supergravitatietheorie hebben kan. Door een zekere hoeveelheid gegoochel met getallen trof men in dit systeem een grotere symmetriestructuur aan dan in onze oude vierdimensionale ruimte. De waargenomen velden en deeltjes pasten er nu ruimschoots in. Door de grotere symmetrie leken de ongewenste oneindigheden nog beter tegen elkaar weg te vallen dan voorheen.

Nu stond dit beeld lijnrecht tegenover de opvatting dat ruimte en tijd misschien uit losse punten bestaan, want dan heeft het hele begrip ‘dimensies’ ook geen betekenis meer. Maar wiskundigen laten zich door zo'n ogenschijnlijke tegenstrijdigheid niet terugschrikken. Volgens de wiskundigen bestaan er allerlei verbanden tussen de wiskunde van opgerolde ruimtes en de wiskunde van de gehele getallen (waarmee je losse punten in de ruimte zou kunnen aanduiden). Misschien bestaan er diverse verschillende, wiskundig gelijkwaardige manieren om de structuur van onze ruimte en tijd uit te beelden? We weten het niet.

Mijn opvatting was dat de elfdimensionale superzwaartekrachttheorie op z'n best maar een puntje van een schitterende ijsberg kon zijn, of zelfs helemaal fout is. We moeten namelijk niet vergeten dat we hier slechts met een stel wilde ideeën te doen hebben en dat de theoretische argumenten voor deze ideeën nog uiterst zwak zijn. Waarom supersymmetrie? Waarom elf dimensies? Omdat alles dan zo mooi symmetrisch is? En vooral: waarom nog steeds een continuüm, als we weten dat

ruimte en tijd zelf hun betekenis op ultrakorte afstanden verliezen?

Een moeilijkheid zou ook zijn dat in dit soort theorieën de krachten tussen de deeltjes altijd als *storingen* werden omschreven, in de anderszins ideale rechte banen die de deeltjes zouden beschrijven. Je krijgt dan ook weer storingen op storingen, en dan ook daar weer storende effecten op, enzovoort. Deze storingsreeks houdt nooit op, en staat een exacte formulering van de theorie dan ook flink in de weg. Dit probleem bedreigde het gewone standaardmodel weliswaar ook al, maar daar kon je tenminste nog zeggen dat waar het erop aankomt de krachten klein gehouden kunnen worden, zodat de reeks storende effecten snel convergeert. Dat kon bij onze (super-) zwaartekrachttheorieën niet meer zo zijn; op kleine afstandsschaal worden daar de krachten sterk.

Eigenlijk was ik dan ook opgelucht toen in deze theorie de moeilijkheden zich aankondigden en het niet mogelijk leek te bewijzen dat de oneindigheden in diagrammen met meer dan *zeven* gesloten lussen tegen elkaar blijven wegvallen. Men keerde de theorie de rug toe, want er diende zich iets leukers aan. Voorlopig althans, want we zouden weer op deze merkwaardige theorie terugkomen!

26 De supersnaar

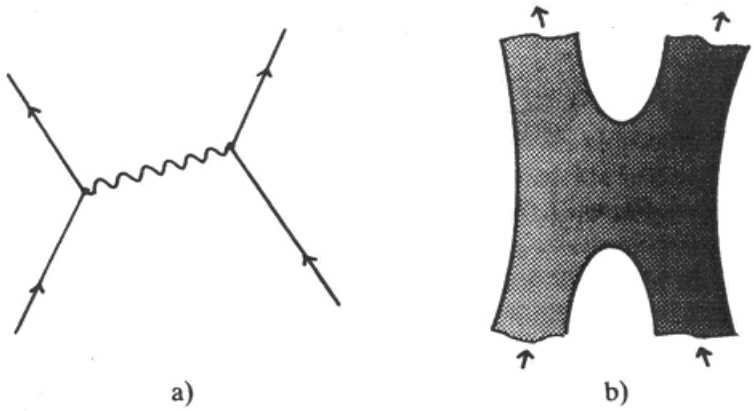
De geschiedenis van de supersnaren begint in de prehistorie van de deeltjesfysica: de jaren zestig. In hoofdstuk 13 vertelde ik hoe Gabriele Veneziano speelde met formules voor de sterk op elkaar inwerkende mesonen. Pas enige jaren later werd het duidelijk dat dit de formules waren die je krijgt als je je deze mesonen voorstelt als een soort touwtjes met quarks aan hun uiteinden. De touwtjes zijn oneindig rekbaar, want terwijl je ze uitrekt voeg je er energie aan toe die in massa wordt omgezet: meer touw.

De reden waarom Veneziano's formule heel aardig de waargenomen eigenschappen van de mesonen weergaf, werd toegeschreven aan het feit dat de mesonen er ook ongeveer zo uitzien. Echter, de touwtjes hebben een zekere dikte; het zijn de veldpatronen van de kleurkrachten tussen de quarks. Daarom werd Veneziano's formule bij hogere energie minder nauwkeurig. De quantumchromodynamica, ofwel de kleurijktheorie ging hier met de eer strijken. Maar dat betekende niet dat men de Venezianoformule opgaf. Zou je geen alternatieve theorie voor sommige soorten deeltjes kunnen construeren die uit echte ideaal elastische touwtjes, of *snaren* (‘strings’) zijn opgebouwd? Er werd onderzocht of de theorie van onderling wisselwerkende snaren niet verbeterd kon worden.

De filosofie was in wezen eenvoudig. Tot nu toe werden alle deeltjes in het standaardmodel opgevat als puntvormig. Als een quark of lepton daarvan afwijkt, is dat alleen omdat deze zich omringen met een ijle wolk van andere puntvormige deeltjes. Deeltjes kunnen in eerste instantie alleen met elkaar wisselwerken als ze zich in hetzelfde punt van de ruimte bevinden (indirecte wisselwerking vindt plaats als ze een derde deeltje zoals een ijkfoton uitwisselen). Ook de krachtvelden die met deze deeltjes geassocieerd zijn, zijn in ieder afzonderlijk punt van de ruimte-tijd ‘waameembaar’.

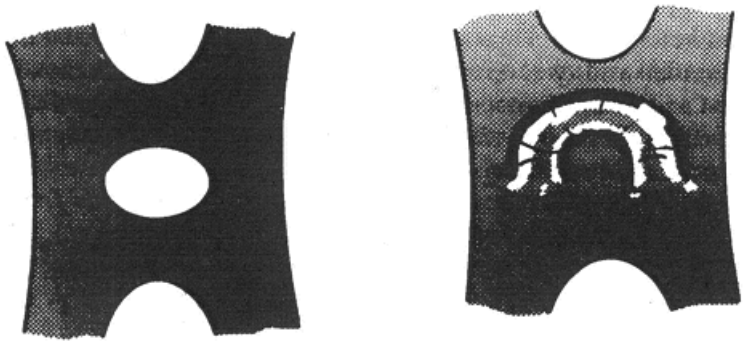
Dit nu, zo redeneerde men, gaan we anders doen. De eerste wiskundige figuur die komt na een ‘punt’ is de ‘kromme’, ofwel een willekeurige kromme lijn die zich ergens in de ruimte bevindt en zich volgens bepaalde wetten daarin voortbeweegt. Intuïtief zou je denken dat de interactie tussen puntvormige deeltjes onnatuurlijk is, want hoe kunnen die elkaar ooit vinden? De eis dat punten samenvallen moet haast wel tot oneindigheden aanleiding geven, zoals in de ‘gewone’ veldentheorie ook gebeurt. Voor krommes daarentegen is het veel gemakkelijker elkaar ergens tegen te komen en een uitwisselingsproces aan te gaan.

Voor de eenvoudigste snarentheorie gaat deze redenering niet helemaal op. Daar vinden de interacties plaats doordat de uiteinden van twee krommes aan elkaar geknoopt raken, of, juist andersom, wanneer een kromme breekt. En helemaal natuurlijk lijkt dit ook weer niet. Toch is dit een verbetering ten opzichte van een theorie met puntdeeltjes.



Figuur 27. a) Feynmandiagram. b) Snaardiagram. Het diagram geeft aan hoe de uiteinden van de snaren zich in de ruimte-tijd voortbewegen. In tegenstelling tot diagram a) is hier niet eenduidig aan te geven waar de ‘interacties’ precies plaatsvonden.

Volgen we zo'n interactieproces tussen snaren in de ruimtetijd dan zien we dat de gebruikelijke Feynmandiagrammen worden vervangen door ‘snaardiagrammen’ die een elegantere aanblik vormen, zie figuur 27. Als je redeneert dat de meeste moeilijkheden van de gewone veldentheorieën komen doordat de deeltjes gedwongen worden samen te komen in speciale punten, de ‘vertices’, dan zou je kunnen vermoeden dat de snarentheorie van dit soort moeilijkheden gevrijwaard blijft. Want in figuur 27b ziet u dat die speciale punten, of vertices, afwezig zijn.



Figuur 28. Snaardiagrammen van hogere orde.

Maar de snarentheorie was niet af. Net zoals de elementaire deeltjes ‘lusdiagrammen’ kunnen vormen, zoals in figuur 25, moeten ook in de snaardiagrammen ingewikkeldere patronen mogelijk zijn. Na een uitwisselingsproces zouden twee snaren nog eens met elkaar kunnen reageren, en dan krijg je diagrammen zoals in figuur 28. Het berekenen van zulke diagrammen bleek allerminst een eenvoudige opgave. De rekenregels moesten helemaal opnieuw worden uitgevonden. Net zoals Richard Feynman de rekenregels voor de lusdiagrammen in ijktheo-

rieën opnieuw moest opstellen, zo moest men nu weer door zo'n proces heen. De eerste resultaten bevatten goed nieuws en slecht nieuws.

Eerst het goede nieuws. Inderdaad, de oneindige uitdrukkingen waar de ‘vroegere veldentheorie’ steeds door werd geplaagd blijven achterwege. Alle uitdrukkingen die je krijgt lijken goed gedefinieerde wiskundige formules te zijn. Is dat goed nieuws? We hadden immers juist geleerd hoe we met de oneindige uitkomsten van de oudere veldentheorieën moesten omspringen? Als je het maar voorzichtig doet, zijn alleen onwaarneembare zaken zoals de ‘naakte massa’ en de ‘naakte lading’ van de deeltjes slecht gedefinieerd, maar controleerbare voorspellingen zoals de botsingskansen waren al goed uit te rekenen. Nou ja, het leven is dus voor de snaartheoreticus een beetje gemakkelijker geworden. Wel krijg je nu extra dat de theorie hanteerbaar blijft als de ruimte-tijd meer dan vier dimensies heeft, à la Kaluza-Klein. In meer dan vier dimensies was geen enkele standaardveldentheorie renormeerbaar, dat wil zeggen bestand tegen de oneindigheden. De snarentheorie laat zich dus goed combineren met het spelletje van Kaluza en Klein.

Maar nu het slechte nieuws. De rekenregels klopten niet precies. Net zoals Feynman spookdeeltjes ontdekte in de ijktheorieën waren ook in de snarentheorie spookoplossingen aanwezig. De enige manier om die kwijt te raken was door de snaarparameters op een heel speciale manier te kiezen. Maar dan volgde dat er weer andere oplossingen ontstonden die zich sneller voortbewegen dan het licht. Nou, dat is lood om oud ijzer. Weliswaar zijn auteurs van sciencefictionromans verzot op deeltjes die sneller gaan dan het licht - zittend op (of in) zulke objecten zouden we dan maar weinig tijd nodig hebben om comfortabel naar verre sterrenstelsels te reizen - maar voor de serieuze natuurkunde zijn dit soort deeltjes een ramp. Minder scrupuleuze natuurkundigen hebben zich bezondigd met het

rekenen aan dit soort hypothethische deeltjes en ze *tachyonen* (Grieks ταχύς, = snel) genoemd. Maar volgens de quantummechanische wetten voor elementaire deeltjes zou in een theorie met tachyonen erin de lege ruimte (vacuüm) *niet stabiel* zijn. Zo'n theorie is onbruikbaar.

En dus was er werk aan de winkel voor de kleine groep van fanatieke aanhangers van de snarentheorie. En die waren er. De wiskunde van deze theorie leek te mooi om onaangeroerd te laten, en de uitdaging om de theorie zodanig te verbeteren dat de tachyonen zouden verdwijnen, was te verleidelijk om niet aan te nemen. Weliswaar leverde de theorie oplossingen op waarin kleine stukjes snaar zich als tachyonen voortbewegen, maar het zijn er maar een paar, één met spin 0 en één met spin 1. En je kreeg er iets heel leuks voor terug: andere, massaloze snaarconfiguraties met spin 0, 1, en *met spin 2*! Dit waren géén tachyonen. Het massaloze spin-1-deeltje bleek zich precies als een ijkfoton te gedragen, en, wat men heel verrassend vond, het massaloze spin-2-deeltje gedraagt zich als het graviton. Maar dat betekende dat de snarentheorie *automatisch* de zwaartekracht zou voortbrengen! Dus de snarentheorie levert niet alleen deeltjes op van het type dat we werkelijk waarnemen, maar de zwaartekracht, en kennelijk ook de bobbelige ruimte-tijd, zitten al ingebakken in deze theorie.

En zo kwam het dat men de snarentheorie als een mogelijke kandidaat ging zien voor een theorie die alle moeilijkheden met de zwaartekracht zou oplossen, ja, de zwaartekracht is in deze theorie al geünificeerd met alle andere krachten! Dit is dan wel een variant van de snarentheorie die niets meer te maken heeft met de mesonen en de sterke kracht, zoals oorspronkelijk Veneziano's bedoeling was. Dit zijn snaren die niet de afmetingen van protonen en pionen aannemen maar bijna net zo klein zijn als de Plancklengte, dus zo'n achttien nullen kleiner. De spanningskracht van deze snaar is niet veertien ton, zoals de ‘snaar’ die de quarks verbindt, maar een onvoorstelbaar veel groter

bedrag (36 nullen erbij). Alleen zo zou deze snaar een voldoende *zwakke* zwaartekracht teweegbrengen.

Ik herinner me een discussie met John Schwarz in het California Institute of Technology te Pasadena omstreeks 1978, waarbij John me probeerde te overtuigen van de mooie beloftes van een snarentheorie. In een tijd dat de meeste natuurkundigen nog bezig waren met de superzwaartekrachttheorieën profeteerde hij al over een snarentheorie die de T.v.A. zou zijn ('Theorie van Alles'). 'Stel nou dat we die spookoplossingen en die tachyonen op één of andere manier kwijt kunnen raken, en ik heb daar allerlei ideeën over,' zei hij, 'zou je dan niet denken dat dit de ultieme theorie kan worden?'

Ik was hier sceptisch over, maar ik kon hem niet van deze gedachte afbrengen. Maar goed ook, wellicht, want in 1984 kwamen er steeds meer enthousiaste berichten uit de Verenigde Staten, die weldra werden bevestigd door steeds meer onderzoekers, aangestoken door een nieuwe ontdekkingskoorts. John Schwarz was samen met de Engelsman Michael Green de trotse ontdekker van de juiste methode om de tachyonen te lijf te gaan. Het antwoord was een speciale keuze van een grote inwendige symmetriestructuur, en dat alles in een zesentwintigdimensionale ruimte. Tweeëntwintig van die zesentwintig dimensies moesten opgerold zitten volgens de theorie van Kaluza en Klein die ik in het vorige hoofdstuk heb beschreven.

De wiskunde werd verder uitgeplozen door een jonge geniale mathematisch-fysicus, Edward Witten, die er samen met Green en Schwarz een lijvig tweedelig boek over schreef (de kleuren van de omslag ervan laten zich raden). Er werd ook ontdekt dat je *supersymmetrie* kon hebben op de snaar, maar dan moest je werken in *tien* dimensies, waarvan dus zes zijn opgerold. De supersymmetrie werd veroorzaakt door het feit dat er aan deze snaar ook fermionische deeltjes vastzaten, als kralen op een ketting. Op zich had men dit idee al eerder gehad, want ten slotte moesten er ook fermionen in onze theorie wor-

den gegenereerd, maar de ontdekking dat alle moeilijkheden gelijktijdig konden worden geëlimineerd in deze tiendimensionale snaar was nieuw.

David Gross ontdekte samen met zijn groep in Princeton dat je de fermionen aan de snaar allemaal één kant op kunt laten lopen, mits de golfbewegingen op de snaar die die kant op lopen tien dimensies hebben, en die welke de andere kant uit lopen in een zesentwintigdimensionale wereld leven. Hij noemde dit de ‘heterotische snaar’, en het aardige hiervan is dat je dan een asymmetrie tussen links en rechts teweegbrengt die heel veel lijkt op de asymmetrie die we ook werkelijk zien in de zwakke kracht.

Uiteindelijk bleek dat er verschillende soorten supersnaartheorieën waren, aangeduid als type I, type IIA en IIB, en twee soorten heterotische snaar, maar met name Witten bleef zeggen dat deze theorieën niet echt verschillend zouden zijn, maar eerder als verschillende manifestaties moesten worden beschouwd van wat in wezen één fundamentele snarentheorie zou moeten worden.

Het scheelde niet veel of de enthousiaste onderzoekers voerden een nieuwe jaartelling in voor de natuurkunde: het jaar 1984 was voor hen het nieuwe jaar nul. ‘Het beste sinds de ontdekking van de quantummechanica,’ werd er gezegd. Inderdaad vertoonde de snarentheorie zeer belangwekkende eigenschappen. Ten eerste kwamen er geen oneindige uitdrukkingen in voor zodat de renormeringsprocedure, die toch voor velen moeilijk verteerbaar leek te zijn, overbodig was geworden. Ten tweede vormde de zwaartekracht een onverbrekelijk onderdeel van deze theorie. Het graviton is, net als alle andere ‘elementaire’ deeltjes, voor te stellen als een klein gesloten lusje van dit snaarmateriaal. Zoals een vioolsnaar op allerlei verschillende manieren aan het trillen kan worden gebracht, zo kan ook de supersnaar in vele verschillende trillingstoestanden verkeren. De meeste van deze trillings- (en draaiings)toestan-

den zijn heel zwaar; hun massa is in de buurt van de Planckmassa. Maar er zijn, mede omdat we ook nog heel wat ‘opgerolde dimensies’ hebben, nog heel wat oplossingen van de vergelijkingen voor de snaar die deeltjes met een zeer kleine massa kunnen voorstellen. Dit zijn dan de verschillende soorten deeltjes die in het standaardmodel staan opgesteld.

Een derde, heel belangrijk aspect van de snarentheorie was dat je niet zomaar extra deeltjes aan de theorie mag toevoegen. Het is een ‘package deal’: je accepteert de hele theorie of je verwerpt haar in haar geheel. Andere deeltjessoorten zouden geen interacties met deze snaar kunnen aangaan. Men voorspelde dat alle deeltjes in deze theorie geheel berekenbaar zijn, want er komt in deze theorie geen enkele onbekende natuurconstante meer voor. Dit is weer een voorbeeld van iets dat we eerder al tegengekomen waren in dit boek en dat ik ‘holisme’ noemde: de relativiteitstheorie van Einstein duldt ook al geen enkele uitzondering, net zomin als de regels van de quantummechanica.

Overigens speelt supersymmetrie een belangrijke rol in de supersnarentheorie. Veel onderzoekers verwachtten dan ook dat als je vanuit deze theorie uitrekent hoe de Grote Woestijn eruitziet daar ook een rol is weggelegd voor de vroegere superzwaartekrachttheorie. Maar superzwaartekracht werkt in *elf* dimensies en de supersnarentheorie in tien. Waar is die extra dimensie gebleven? Vooralsnog moest men concluderen dat de supersnaren veelbelovender waren. Nu werd de supersnarentheorie als voorbode beschouwd van een ‘Theorie van Alles’. Er is geen speld meer tussen te krijgen, zo werd er al geroepen, de speurtocht naar het allerkleinste is ten einde. Alleen nog een paar technische details moesten worden uitgezocht...

Als dit boek verfilmd wordt moet er nu een onheilspellend muziekje op de achtergrond gaan klinken. Die ‘paar technische details’ boden namelijk hardnekkige weerstand. Ten eerste waren er de opgerolde dimensies. Dat oprollen kan op een groot

aantal verschillende manieren. Als je twee oproldimensies hebt, kun je kiezen of je ze afzonderlijk oprolt tot pijpjes, of samen tot één enkele voetbal. Maar in zo'n heterotische supersnarentheorie hebben we in één richting zes en in de andere richting tweeëntwintig op te rollen dimensies, en nu wordt het aantal opties gigantisch. Welke procedure heeft de natuur hier gevolgd? 'We kunnen alles uitrekenen,' zei men, 'dus dit ook!' Maar dat bleek niet waar. Niet alles is uit te rekenen, althans niet met de wiskundige technieken die we nu kennen. De snarentheorie is namelijk, net als de andere deeltjestheorieën, een *storingstheorie*.

De interacties werken als storingen op een anderszins ideaal voortbewegende snaar. Om de werkelijke bewegingen uit te rekenen moet je een *oneindige reeks* storingscorrecties uitrekenen. Niet alleen kan niemand een oneindige reeks berekeningen uitvoeren, het is bovendien vrijwel zeker dat de berekeningen niet zullen convergeren. Dit betekent dat er altijd een stadium in de berekeningen aanbreekt waar het resultaat na het doorrekenen van een volgende storingscorrectie *slechter* wordt dan daarvoor. Strikt genomen betekent dit dat we helemaal geen theorie hebben! In de gewone deeltjestheorie was dit probleem niet zo'n ramp. Je kunt namelijk aanvoeren dat het stadium van de berekeningen waar de storingsreeks niet meer convergeert zo ver weg ligt dat de 'voorlopige' resultaten toch zeer nauwkeurig zijn. Het standaardmodel is *niet oneindig nauwkeurig*!

Dat geven we toe, maar voor het standaardmodel was dit een louter academisch probleem. De praktische moeilijkheden bij het doen van nauwkeurige berekeningen zijn vele malen ernstiger. Voor de snarentheorie echter was dit probleem desastreus. De meeste dingen die we zouden willen uitrekenen, kunnen niet uit de storingsreeks worden verkregen. Hoe zijn de extra dimensies opgerold? Wat zijn de massa's van de lichtste deeltjes? (Die getallen zijn uiterst klein in vergelijking met de Planckmassa van 21 microgram.) Enzovoort. Nu ontbrak het

niet aan ideeën in het kamp van de supersnaartheoretici, maar betrouwbare antwoorden kon men niet geven. Er wordt hard gewerkt aan een ‘snaar-veldentheorie’, waarmee men hoopt die vervelende storingsreeks te kunnen omzeilen. Hoe men zoiets kan hopen, weet ik niet. In de gewone deeltjestheorie werken we al lang met velden en kunnen we niettemin het gebruik van storingstheorie helemaal niet vermijden.

Vanaf het begin heb ik steeds gewaarschuwd dat je de snarentheorie niet een ‘theorie’ zou mogen noemen maar eerder een ‘model’, of nog liever een ‘idee’. Want bij een theorie zouden ook voorschriften horen die gevolgd moeten worden als men de bestaande deeltjes in dit schema wil identificeren, en de rekenregels die je, althans in principe, in staat zouden moeten stellen hun eigenschappen uit te rekenen en daar nieuwe voorspellingen over te doen. Als ik u een stoel geef maar erbij vertel dat de poten nog ontbreken en dat de zitting en de leuning binnenkort waarschijnlijk zullen worden geleverd, mag ik dan datgene wat ik u geef nog wel een stoel noemen? Maar zo onaardig wil ik niet zijn. Het idee is prachtig en veelbelovend, maar de hoeveelheid werk die er nodig is om het in een bruikbare theorie om te zetten, mag niet onderschat worden. En er kan nog van alles fout gaan. Daar ik geen aandeel had in de snarentheorie kon ik onverbloemd mijn vermoeden uiten: het is (weer) een tussenstadium. De ware Theorie van Alle Krachten zal op geheel andere principes berusten, ook al kan het huidige onderzoek aan de snaren en supersnaren nog heel nuttig gereedschap gaan opleveren bij onze speurtocht daarnaartoe.

Lang niet iedereen is het daarmee eens. De situatie is hier heel anders dan we gewend waren, zo stelt men. Dankzij de supersymmetrie kun je namelijk veel meer over dit systeem zeggen dan wat je uit de storingsreeks kunt halen. ‘Wij denken dat dit een exacte theorie is, ook al weten we nu nog niet hoe je precies moet uitrekenen welke elementaire deeltjes er uiteindelijk uit zullen komen rollen en waarom het standaardmodel eruit-

ziet zoals dat is gevonden. Maar als alle deeltjes zijn opgebouwd uit snaren dan is er geen ruimte meer voor andere interacties. Alles moet uit deze theorie volgen! *Stay tuned*!'

Met dat soort spectaculair georakel kun je rekenen op heel wat aandacht van de media, en sommigen van mijn collega's vielen daarvoor. Je neemt dan wel aan dat het mechanisme dat supersymmetrie heet al je problemen kan oplossen. Maar in de werkelijke wereld is supersymmetrie zodanig gebroken dat we er niets meer van kunnen zien; er moet wel meer aan de hand zijn.

Dit is buitengewoon complexe materie, maar er gaat een magische aantrekkingskracht van uit naar jonge, energieke en geniale onderzoekers. En zo kon het zijn dat er toch nog snelle verbeteringen optraden in ons inzicht hierover. Die boeiende ontwikkelingen vormen het laatste, nieuwste gedeelte van dit boek.

27 Het zwarte gat

De situatie in de supersnaartheorie dreigde nogal ondoorzichtig te worden: trillende supersnaren zouden niet alleen de elementaire deeltjes, maar ook onze ruimte en tijd zelf hun structuur moeten geven. Hebben we ons zo ver in de wereld van het volmaakt onbekende gestort dat we door onzin worden verstrikt? Begraven we onszelf onder zo veel vragen dat we voor de wetenschap als verloren mogen worden beschouwd? Heeft het nog wel zin naar een Theorie van Alle Krachten te zoeken in deze vreemde wereld van de Planckgetallen? De titel van dit hoofdstuk doet u wellicht het ergste vermoeden.

Niets prikkelt onze nieuwsgierigheid meer dan het onbegrijpelijke. Wat zo merkwaardig is aan de wereld van de Plancklengte is dat er *geen enkel* model gevonden is dat een sluitend voorschrift geeft voor de gedragingen van deeltjes wanneer ze elkaar met zo sterke zwaartekrachtsvelden beïnvloeden. Dus zelfs al zouden we experimenten kunnen doen met deeltjes die de Planckmassa hebben, dan zouden we niet weten hoe de uitkomsten met theorieën vergeleken moeten worden. Er is dus werk te doen voor de natuurkundigen: maak een theorie. Wat deze theorie zal doen met de heel sterke zwaartekrachtsvelden kan ons niet zoveel schelen. Wel staan er een heleboel vereisten op ons verlanglijstje die het creëren van zo'n theorie zo moeilijk maken.

De theorie moet natuurlijk in de allereerste plaats wiskundig nauwkeurig zijn en precieze berekeningen mogelijk maken onder alle omstandigheden waarin deeltjes elkaar tegen kunnen komen. We krijgen dikwijls brieven van amateurnatuurkundigen die ons heel aardige ideeën proberen aan te praten waar we echter niets aan hebben omdat de voorschriften niet de strengheid hebben waaraan we in het vak inmiddels gewend zijn.

Ten tweede willen we uiteraard dat in onze theorie de zwaar-

tekracht op zodanige wijze wordt gehanteerd dat er overeenstemming is met de formulering ervan in de algemene relativiteitstheorie van Einstein. We weten dat de zwaartekracht van grote lichamen zoals sterren en planeten heel nauwkeurig aan deze theorie gehoorzaamt. Onze nieuwe theorie moet hierbij aansluiten.

Ten derde weten we dat de wetten van de quantummechanica onverbiddelijk zijn. We willen dus ook dat onze theorie binnen het raam van de quantummechanica kan worden geformuleerd.

Zowel de quantummechanica als de relativiteitstheorie heeft de eigenschap dat als je ook maar de geringste afwijking van hun principes toestaat er een totaal andere theorie ontstaat die in niets meer lijkt op wat we weten van de natuur. ‘Een beetje quantummechanisch’ of ‘een beetje relativistisch’ zijn net zomin mogelijk als ‘een beetje zwanger’. Wel is het denkbaar dat ofwel de quantummechanica ofwel de relativiteitstheorie ofwel beide een te *eng* raamwerk zullen zijn voor de nieuwe theorie, dus dat je de principes verder moet uitbreiden. Maar negeren kun je ze niet. Ik zal u niet te veel vermoeien met pogingen theorieën uiteen te zetten die we zelf niet begrijpen, maar ik wil wel aangeven welke wegen er nog zijn die verder bewandeld kunnen worden.

In het heelal bevinden zich sterren met een massa die aanzienlijk meer is dan die van onze eigen ster, de zon. Daardoor is de zwaartekracht aan de oppervlakte aanzienlijk sterker dan op aarde of op de zon. De enorme hoeveelheden materie in zo'n ster veroorzaken in zijn binnenste een onvoorstelbaar hoge druk. Alleen doordat de temperatuur daarbinnen ook gigantisch is, is de tegendruk binnenin voldoende om de ster tegen ineenklappen te behoeden.

Echter, de ster verliest warmte. Eerst vinden er nog allerlei zeer energierijke kernreacties plaats die de temperatuur hoog genoeg houden en zelfs doen toenemen, maar de nucleaire

brandstof raakt vroeg of laat op. Hoe zwaarder de ster, des te hoger de druk en de temperatuur, en des te sneller wordt de nucleaire brandstof verbruikt. Dan wordt de tegendruk minder en het binnenste van de ster ‘bezwijkt’ onder de druk. Door het kleiner worden neemt de zwaartekracht in sterkte alleen maar toe en een implosie (een plotseling ineenklappen) kan dan niet meer uitblijven.

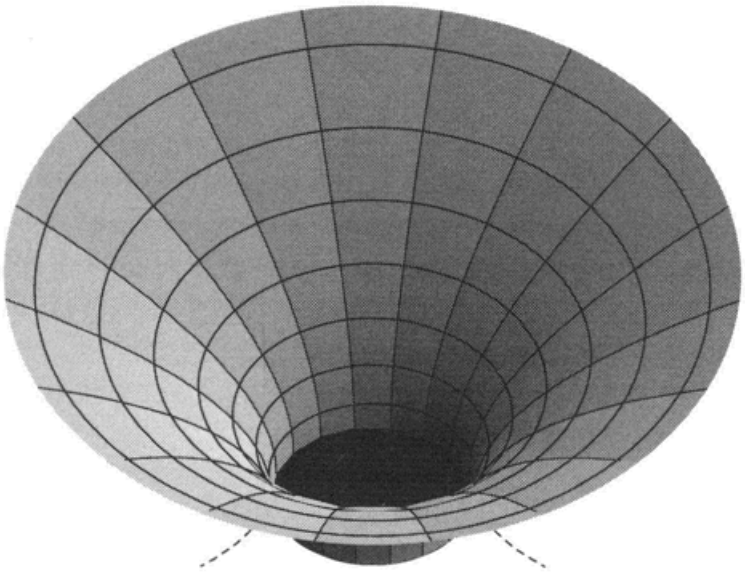
Meestal ontstaat er bij deze implosie nog zo veel hitte dat een groot deel van de buitenste schil van de ster door de stralingsdruk wordt weggeblazen. Dan kan de implosie nog tot staan worden gebracht en blijft er een uiterst compacte bol van ‘kernmaterie’ over: een zogenaamde neutronenster. Deze neutronenster vertoont vaak een zeer hoge draaisnelheid (tot ongeveer duizend omwentelingen per seconde), en onregelmatigheden op het oppervlak veroorzaken dan een snel pulserend radiosignaal. Dit radiosignaal was waaraan men deze objecten het eerst ontdekte en ze heten daarom ook wel ‘pulsars’. In de astronomische tabellen worden pulsars aangeduid met de lettercombinate ‘lgm’. Dit stamt uit de tijd dat men nog dacht aan de mogelijkheid dat deze vreemde pulserende signalen van een buitenaardse beschaving afkomstig waren: ‘Little Green Men’.

Als er niet voldoende materiaal van de buitenste schil is weggeblazen of als er weer nieuwe materie op de pulsar terecht komt, is ook deze compacte materiebol niet meer tegen de druk bestand. De berekeningen van de astronoom-natuurkundige Subrahmanyan Chandrasekhar tonen onweerlegbaar aan dat als de massa van een compact, afgekoeld object meer is dan enkele zonsmassa's er geen enkele soort materie bestaat die zo veel druk kan weerstaan. De zwaartekracht wordt nu zo sterk dat alleen Einsteins relativiteitstheorie precies kan vertellen wat er gebeurt. Doordat de zwaartekracht *collectief* werkt op alle deeltjes in de ster en voor deeltjes afzonderlijk nog heel zwak is, hoeven we nog niets te weten omtrent de ‘*quantum*-zwaartekracht’ om toch al heel precies de gebeurtenissen te

kunnen voorspellen. De ons bekende natuurwetten zijn daartoe volledig toereikend. We koesteren geen enkele twijfel omtrent de uitkomst van deze berekening.

De uitkomst is een ‘zwart gat’. Een zwart gat ontstaat wanneer de ineenstortende materie op zeker moment de lichtsnelheid bereikt. Er wordt dan een grens overschreden, een ‘point of no return’. Een (onfortuinlijke) ruimtereiziger die met deze ineenstortende materie mee naar binnen gaat, kan op dat moment niet meer terug, ongeacht de sterkte van de motoren van zijn ruimteschip, want zelfs als hij ter plekke met de lichtsnelheid zou omkeren, zou hij er niet in slagen te ontsnappen. Ook alle signalen die hij dan verstuurt, komen niet meer naar buiten.

Als men dit alles op veilige afstand zou gadeslaan zou men weldra geen enkel signaal meer van de invallende materie en de mee naarbinnen vliegende ruimtereiziger kunnen detecteren. Het object wordt zwart, vandaar de naam ‘zwart gat’. Omdat



Figuur 29. De gekromde ruimte-tijd nabij een zwart gat (fantasieweergave).

een zwart gat uiteindelijk niets anders is dan een bal ‘pure zwaartekracht’ kunnen zijn eigenschappen met wiskundige precisie worden berekend. Slechts drie getallen zouden er nodig zijn om een gegeven zwart gat volledig te karakteriseren: zijn *massa*, zijn *impulsmoment* (draaibeweging) en zijn *elektrische lading*.

Wat we verder precies kunnen uitrekenen, is hoe bundels elementaire deeltjes zich gedragen als zij zich dicht bij een zwart gat wagen. Stephen Hawking bestudeerde dit rond 1974. Hij stuitte op een moeilijkheid die in het begin op een formaliteit leek. Wanneer precies noem je iets nu een deeltje, en wanneer is het slechts een bij drage tot de structuur van de lege ruimte? Wat voor een onderzoeker die bezig is *in* het gat te vallen op lege ruimte lijkt, blijkt voor een buitenstaander deeltjes te bevatten die nog net op het nippertje aan het zwarte gat konden ontsnappen. Een ongerijmdheid in de theorie? Dit is wat hij eerst dacht,maar hoe hij de berekening ook deed, er bleef altijd een stroom deeltjes over die ontsnappen. En toen deed hij de ontdekking die ik nog steeds als zijn allerbelangrijkste beschouw. Die deeltjes zijn echt! Ieder zwart gat zendt een constante stroom deeltjes van alle soorten uit.

De intensiteit van deze deeltjesemissie is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de massa van het zwarte gat. Voor zwarte gaten waarover de sterrenkundigen het hebben is deze emissie zo uiterst zwak dat zij altijd overstemd wordt door al datgene wat er *in* het gat valt, zelfs als het ver verwijderd is van andere sterren of sterrenstelsels. Maar nou gaat het even om het principe: er kan iets uit een zwart gat komen, en het komt er spontaan uit.[1]

1 De deeltjes die uit een zwart gat komen volgen de statistische wetten van *warmtestraling*. Het zwarte gat heeft een bepaalde temperatuur, en de straling is als die van een sneeuwvlok, gloeilamp of als die van een ster. Er zullen dus zeer beslist géén kleine groene mannetjes of ruimtevaarders uit een zwart gat kunnen komen!

Dit betekent dat een zwart gat massa kan verliezen en dus lichter zou kunnen worden dan de kritische massawaarde die Chandrasekhar berekend heeft. En hoe lichter het zwarte gat is, des te sneller het nog meer massa verliest. Een snelle berekening leert dat als het zwarte gat een massa heeft van een kleine berg het nog maar luttele seconden nodig heeft om al zijn massa in de vorm van straling naar buiten te slingeren. Dat zou een heel wat intensievere explosie geven dan de krachtigste kernbom! Nu suggereerde ik misschien dat ook deze berekening uitsluitend gebruikmaakt van geheel bekende natuurwetten en daarom onaanvechtbaar is. Om twee redenen is dat niet helemaal waar.

Ten eerste hebben we nog nooit een zwart gat van nabij kunnen bestuderen en zeker niet een zwart gat dat zo klein is dat zijn Hawkingstraling zou kunnen worden gedetecteerd. We weten zelfs niet of zulke kleine zwarte gaten in het heelal aanwezig zijn of slechts een uiterst onwaarschijnlijke zeldzaamheid. Zelfs al denken we de theorie te kennen dan had het geen kwaad gekund als deze op een of andere manier getoetst kon worden. Het effect dat Hawking ontdekte is wel degelijk een quantumeffect. Gebeurt alles wel zoals we nu denken dat het gaat?

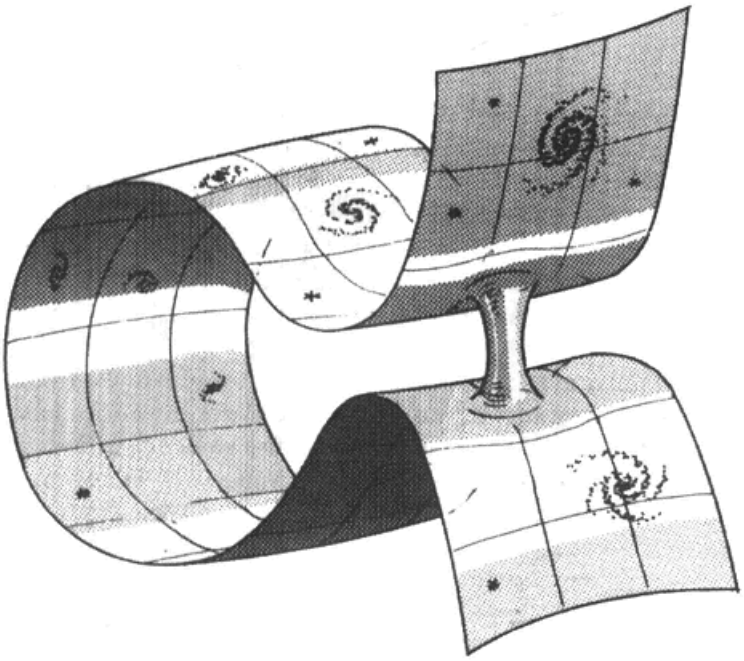
En dan kom ik op mijn tweede punt. Ik kan me namelijk een theorie voorstellen die een ander resultaat geeft. Toen ik hier voor het eerst in geïnteresseerd raakte en naar een volledig sluitende beschrijving van zwarte gaten zocht, probeerde ik verschillende alternatieve theorieën te construeren. En ik kon een theorie formuleren die een andere uitkomst geeft dan de berekening van Hawking: het zwarte gat zou aanzienlijk intensiever kunnen stralen dan Hawking aangaf. Toegegeven, je krijgt die afwijkende uitkomst alleen als je de wetten van de quantummechanica bij een zwart gat op een andere manier hanteert dan overal elders, maar ik meen dat er geen absoluut bewijs bestaat dat dit niet ‘mag’.

Stephen Hawking kende ik inmiddels van diverse conferenties en workshops. Het is onbegrijpelijk hoe hij zijn zware lichamelijke handicap trotseert en een belangrijke rol kan blijven spelen in de hedendaagse theoretische natuurkunde.[1] Nu kan hij uitstekend met ons blijven communiceren dankzij een ingenieuze spraakcomputer die hij met zijn wijsvinger bedient. Met die wijsvinger heeft hij mij bijna, maar toch niet helemaal kunnen overtuigen dat mijn alternatieve theorie niet houdbaar is. Nu ik verder heb gewerkt aan de zwarte gaten geloof ik wel dat zijn berekening de werkelijkheid juist weergeeft. Ik weet het alleen niet zeker.

Er is echter een veel belangrijker aspect aan deze Hawkingstraling verbonden. Het zwarte gat wordt steeds kleiner en de straling steeds intensiever. Vlak vóór het einde zal de afmeting vergelijkbaar worden met de Plancklengte, het zwarte gat zal een massa hebben die weinig meer is dan de Planckmassa en ook de energie van de uitgezonden deeltjes zal met de Planckmassa corresponderen. *Alleen een volledige theorie van de quantumzwaartekracht kan precies voorspellen en beschrijven wat er daarna met een zwart gat zal gebeuren*!

Ziedaar het belang van zwarte gaten voor onze theorie van elementaire deeltjes bij de Plancklengte. Zwarte gaten zouden een ideaal laboratorium kunnen zijn voor gedachte-experimenten. Zij bereiken helemaal uit zichzelf het energiegebied rond de Planckenergie. Een goede theorie moet ook hier kunnen vertellen hoe je rekenen moet. En de snarentheorie dan? Volgens de snarentheoretici hadden zij een *volledige* theorie van alle natuurkrachten, en dus zou hun theorie ondubbelzinnig uitsluitsel moeten geven omtrent de vraag hoe een zwart gat explodeert. Terwijl in de jaren tachtig de snarentheoretici aan

1 Zie Stephen Hawking, *Het heelal. Verleden en toekomst van ruimte en tijd*. Amsterdam, Bert Bakker, 1988. Oorspronkelijke titel *A Brief History of Time*. New York, 1988.



Figuur 30. Een wormgat kan verafgelegen gedeeltes van een heelal verbinden.

de wereld verkondigden dat zij de Theorie van Alles op het spoor zaten, was ik zelf begonnen zwarte gaten te bestuderen. Stephen Hawking beweerde dat zwarte gaten doorgeefluikjes zijn naar andere universums, en dat daarom alles wat er uit een zwart gat komt fundamenteel onberekenbaar is (zie figuur 30). Een theorie zonder voorspellingen?

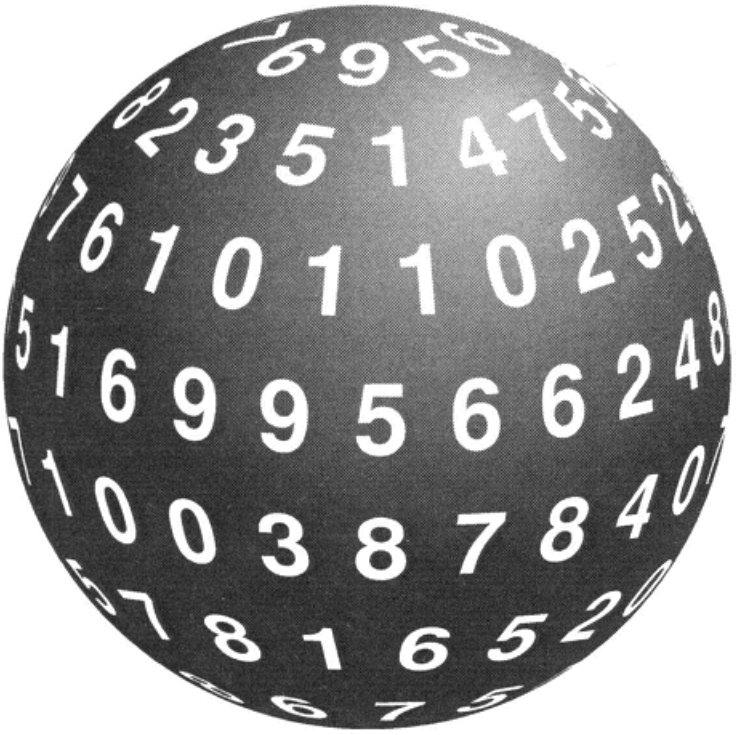
Ik begon hoe langer hoe sterker het vermoeden te krijgen dat noch Hawkings theorie, noch supersnarentheorie hier het correcte antwoord *kunnen* geven! Die theorieën waren namelijk ten eerste in strijd met elkaar, en ten tweede in strijd met mijn

overtuiging dat de Hawkingstraling uit de horizon van een zwart gat komt alsof die een soort huid is die de deeltjes uitademt. Als ik de snarentheoretici hiermee confronteerde kreeg ik een ontwijkend antwoord: hun theorie was ongetwijfeld correct, maar omdat deze vraag nu eventjes te moeilijk was waren zwarte gaten niet interessant voor hen.

Waar de theorieën met elkaar overhoop lagen, was de vraag hoe je de ‘soorten’ zwarte gaten tellen moet. Enerzijds leek het dat ze een rangnummer hebben dat qua grootte precies op de horizon past (zie figuur 31), anderzijds leek het erop dat ze strikt ontelbaar zijn. Hoe moet je zwarte gaten tellen, en hoe karakteriseer je hun rangnummer?

Neem nou een zwart gat, dat zijn leven misschien is begonnen als een groot ‘astronomisch’ zwart gat, en dat nu zijn leven explosief beëindigt. Hoe langer je erover denkt, hoe belangrijker de rol van zwarte gaten in de wereld van het uiterst kleine eruit gaat zien. Mijn uitgangspunt was nu: als je echt wilt begrijpen hoe de zwaartekracht werkt op individuele deeltjes, wat kun je dan beter als gedachtelaboratorium nemen dan het ‘sterkst mogelijke zwaartekrachtsveld’? Als je deeltjes wilt lokaliseren met meer dan de precisie van een Plancklengte, krijgen ze een energie die correspondeert met meer dan de Planckmassa. Maar dan worden het kleine zwarte gaatjes, met afmetingen van méér dan een Plancklengte.

Dit is de moeilijkheid die we al eerder noemden: door het bobbelen van de ruimte-tijd wordt het onmogelijk posities nauwkeuriger te bepalen dan de Plancklengte! Als er een einde komt aan onze speurtocht naar het kleine, dan is dat bij het kleinst mogelijke object: een mini-zwart-gat. Ruimte en tijd verliezen dan hun gebruikelijke betekenis, maar wat ervoor in de plaats komt begrijpen we niet. Onze speurtocht lijkt letterlijk en figuurlijk bij een zwart gat te zijn geëindigd.



Figuur 31. Als we de quantumtoestanden van een zwart gat rangnummers zouden geven, zouden die nummers, met cijfers van ongeveer 10^{-33} cm grootte, net op hun horizon passen (grote zwarte gaten kunnen dus heel veel quantumtoestanden hebben).

28 De branen. De tweede snaarrevolutie

De dingen gaan toch altijd anders dan je denkt. Snarentheoretici waren helemaal niet ongevoelig voor de kritiek dat de zwarte gaten een probleem vormen in hun theorie, maar ze moesten eerst nog een andere ontwikkeling doormaken voordat men dat probleem kon aanpakken. Ze deden een aantal nieuwe ontdekkingen dat het aanzien van snarentheorie grondig zou gaan veranderen.

Volgens de veldentheorie kun je de elementaire deeltjes opvatten als pakketjes - quanta - van energie in een of ander veld. Hun bewegingen kun je dan doorrekenen door een serie van verstoringen op verstoringen te volgen: de storingsreeks. Maar in zo'n theorie kan ook een heel ander soort deeltjes optreden: gebiedjes waar het veld heel sterk wordt, en geregeerd door veel ingewikkeldere vergelijkingen. Die gebiedjes gedragen zich óók als deeltjes, maar die laten zich niet door een storingsreeks vangen. De magnetische monopool van hoofdstuk 14 is daar een voorbeeld van. We noemen deze deeltjes ‘solitonen’.

De ontdekking van Ashoke Sen was dat solitonen ook in de snarentheorie kunnen optreden. Maar hier zijn het geen deeltjes, en ook geen snaarachtige objecten; het zijn membranen! Een membraan is een oppervlakte, het heeft twee ruimtelijke dimensies en niet één, zoals een snaar, of nul, zoals een deeltje. Maar omdat de theorie zelf in tien of meer dimensies is ingebed, kun je nu ook membranen van drie of meer dimensies verwachten. Het aantal dimensies duiden we aan met het getal *p*. Zo kreeg je ‘*p*-branen’! In het Engels vond men ‘*p*-branes’ wel aardig klinken. Ik zal u met de wiskundige definitie van *p*-branen niet vermoeien. Het getal *p* kon van nul tot negen variëren. De *p*-branen met *p*=o zijn gewoon deeltjes of, soms, zwarte gaten! De andere zijn (zwarte) snaren, (zwarte) membranen, en-

zovoort. De regels zijn heel strikt. In de verschillende theorieën zijn slechts bepaalde waarden van het getal *p* toegestaan.

Nu moesten de snarentheoretici zich wel met zwarte gaten gaan bemoeien. En nu was men het snel met mij eens: zwarte gaten moeten een rangnummer hebben dat qua grootte gelijk opgaat met de totale oppervlakte van de horizon. Alleen: hoe leid je dat af uit de snarentheorie?

Men leerde dat je zwarte gaten ook mocht zien als bundeltjes *p*-branen, maar slechts een heel bepaald type zwart gat zou zo goed kunnen worden beschreven dat je het aantal soorten zou kunnen tellen. Weliswaar betrof het hier zwarte gaten in meer dan drie ruimtelijke dimensies, en gaten die verzadigd waren met een of ander veld (‘extreme’ zwarte gaten), waardoor ze zich heel anders gedroegen dan de gaten waar we eigenlijk in geïnteresseerd zijn, maar toch was het resultaat verrassend: het aantal soorten klopt. Deze zwarte gaten althans hebben géén deurtje naar een ander heelal.

Snarentheoretici voelen zich nu in hun overtuiging gesterkt: het zit wel goed met die zwarte gaten. Niettemin tasten we nog in het duister als we ‘gewone’ zwarte gaten willen begrijpen. Wat is er nu precies mis met Hawkings afleiding dat zwarte gaten poortjes vormen naar andere universums? We dachten dat de snarentheorie de einsteinse zwaartekracht correct vertegenwoordigt. Wat is er dan fout aan Hawkings opvattingen? Hierop hebben we nog geen antwoord.

Als een ruimtevaarder door een zwart gat zou reizen naar een van Hawkings andere universums, dan mag hij (of zij) van drie ruimtelijke dimensies spreken die hij om zich heen ziet. Maar het rangnummer van het zwarte gat (met ruimtevaarder en al) paste op een *twee*dimensionaal oppervlak (de horizon). Dat is net alsof de horizon een holografische foto is van de eromheenliggende driedimensionale ruimte! Daarom vatten we onze moeilijkheid samen door dit het ‘holografische principe’ te noemen.

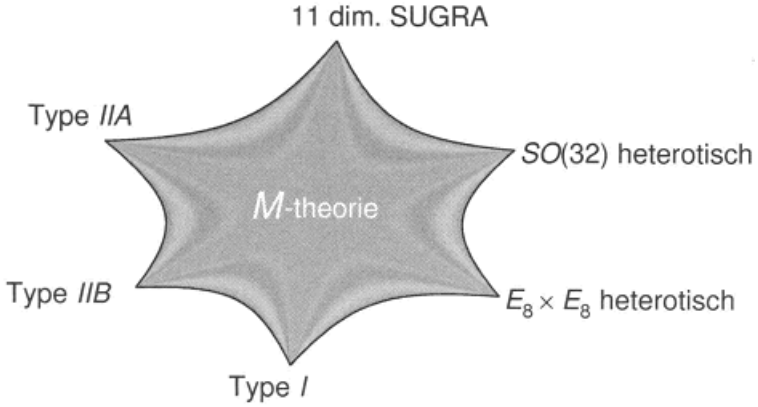
‘Revolutionaire’ resultaten in de snarentheorie hoopten zich echter op. Het was de Argentijnse fysicus Juan Maldacena die opmerkte dat verschillende theorieën, die in een verschillend aantal dimensies zijn gedefinieerd, wiskundig met elkaar te vergelijken zijn - in zekere zin zijn zij identiek! Alweer een holografisch principe. Holografie zag men ineens overal, in de vorm van een wiskundige gelijkenis tussen allerlei ogenschijnlijk totaal verschillende theorieën. Men noemde die wiskundige transformaties ‘dualiteit’, mede omdat deze omstandigheid al langer in de modellentheorie bekend was en daar zo heette. In veel gevallen bleek dat een theorie met zwaartekracht erin, in een gekromde ruimte (‘anti-de Sitter-ruimte’ of AdS) zich precies gedraagt alsof er een veldentheorie ‘met conforme symmetrie’, ofwel CFT zich op de rand ervan bevindt. Er verschijnen thans honderden wetenschappelijke artikelen met ‘AdS-CFT Correspondentie’ in de titel.

Tot voor kort waren er vijf verschillende snarentheorieën, waarvan Witten al eerder het vermoeden had uitgesproken dat die slechts vijf verschillende uithoeken vormden van een en dezelfde theorie. Zo had je de supersnaren type I, type IIA, type IIB, en de twee heterotische snaartheorieën. Nu leek men het instrument in handen te hebben om die verschillende theorieën met elkaar te vergelijken: dualiteit. Een probleem met dualiteit is dat je altijd twee theorieën met elkaar vergelijkt onder omstandigheden waar ten minste een van de twee heel moeilijk te behandelen is. Nog steeds kunnen we in al die theorieën alleen storingsreeksen goed definiëren, en als de reeks in een theorie goed convergeert, is hij in de andere theorie heel slecht. Er is dus een zekere mate van goedgelovigheid voor nodig om deze argumenten te kunnen accepteren.

29 M-theorie, en wat dies meer zij

Toch leek de gehele constructie steeds meer samenhang te vertonen. Men ging steeds meer spreken van één overkoepelende theorie, die ‘M-theorie’ ging heten. Staat ‘M’ voor ‘membraan’, of voor ‘matrix’? Wellicht dacht de naamgever aan ‘Master’, of ‘magie’ of ‘mysterie’. Sommigen spreken honend over de ‘Moeder van alle theorieën’.

Ook al heeft ze dus haar naam niet mee, men denkt dat er één zo'n ‘M-theorie’ zou moeten bestaan, die in allerlei verschillende benaderingen kan worden geformuleerd. Eén daarvan levert dan type I snaartheorie, een tweede levert type IIA, enzovoort. Zie figuur 32. Tot ieders verrassing bleek ook de oude supergravitatietheorie in elf dimensies tot de club te behoren.



Figuur 32. ‘M-theorie’ is een nog niet goed geformuleerde theorie, waarvan echter verschillende uithoeken wel goed in formule te brengen zijn. Dit zijn de reeds bestaande theorieën. Van het aantal dimensies in die uithoeken hangt af hoeveel dimensies van ‘M-theorie’ er gecompactificeerd (opgerold) zijn.

In deze theorie bleek namelijk een membraanoplossing te zitten. Als je een van die elf dimensies heel strak oprolt, gaat het geheel eruitzien als een tiendimensionale theorie, en het membraan wordt een snaar - je krijgt een van de tiendimensionale heterotische snaartheorieën eruit!

Voordat u zegt dat dit alles maar erg vaag klinkt, moet ik de reactie van mijn collega's wiskundigen vermelden. Ed Witten formuleerde zijn bevindingen steeds als zijnde ‘vermoedens’, want doordat de storingsreeksen meestal slecht convergeren, was het moeilijk de juistheid van de dualiteitstransformaties exact te bewijzen. Maar het was wel dikwijls mogelijk te zeggen dat ‘als het vermoeden juist was, dan moest er een verband bestaan tussen bepaalde wiskundige uitdrukkingen’. Keer op keer werden de wiskundigen verbaasd: men had zulke verbanden nooit opgemerkt. Dikwijls leken de beweringen volstrekt onmogelijk totdat men, pas na moeizame en langdurige berekeningen, met open mond moest vaststellen dat het inderdaad klopt. Er lijkt dus wel degelijk iets aan de hand te zijn, de vermoedens zijn niet helemaal op lucht gebaseerd!

Maar hoe nu moet je ‘M-theorie’ exact formuleren? Dit is het bizarre van het verhaal. We weten het niet. Er zijn wel formuleringen die in principe de gewenste formules zouden moeten genereren, gebruikmakend van matrixen (dubbele reeksen van getallen), maar omdat die matrixen heel groot moeten zijn bestaat er veel onzekerheid omtrent de juistheid of eenduidigheid van zulke definities.

Kortom, M-theorie is niet af, zoveel is zeker. Hoe dicht deze ideeën de werkelijkheid benaderen, daar lopen de schattingen erg over uiteen. Enerzijds ben ik ervan overtuigd dat dit bouwsel nog op geen stukken na geschikt is om de werkelijke fysica van de wereld van het kleine correct te beschrijven. Er is nog van alles niet goed. Wat zou u zeggen van een boekhouder die toegeeft dat hij geen enkel inzicht heeft in zijn financiën, zijn eigen handschrift niet kan lezen en zijn boeken niet op volgorde

kan leggen, maar die wel beweert dat iedere controle die hij kan uitvoeren klopt? Dit is precies mijn probleem met M-theorie. Er moet een sluitende boekhouding komen, en hier betekent dat dat er een eenduidige formulering moet komen van alle variabelen die op kleine schaal een rol spelen, deeltjes, velden, snaren, het geeft niet wat, en daarna moet er een eenduidige natuurwet zijn die exact aangeeft hoe deze velden, deeltjes of snaren voortbewegen, zonder dat er *bij de formulering* van die wet een beroep hoeft te worden gedaan op benaderingen. Wat we nu hebben is een soort toverboek, en je moet een magiër zijn om er orakelachtige uitspraken mee te kunnen doen. Zo kan de natuur niet echt in elkaar zitten.

Anderzijds moeten we goed beseffen dat M-theorie veel en veel meer is dan een los samenraapsel van ideeën zoals die mij zo ongeveer wekelijks door allerlei amateur-fysici worden toegestuurd. In boeken zoals deze is het heel moeilijk de zware wiskundige basis die onze theorieën hebben goed te illustreren, en uit de brieven blijkt dan ook dat sommigen denken dat je zonder die wiskunde ook best wel mooie verhaaltjes kunt bedenken - zo kwam er laatst een architect aan met zijn ‘deeltjes-model’: hij dacht dat als wij het over modellen hebben, wij dan van hout, karton en ijzerdraad maquettes in elkaar prutsen, wat hij zelf ook goed kon. Nee hoor, onze deeltjesmodellen bestaan echt alleen maar uit formules, berekeningen, tabellen en grafieken.

M-theorie is dus wel degelijk een professioneel bouwwerk, een bouwwerk bestaand uit formules. Maar er zitten ook hypotheses in, die op intuïtie zijn gebaseerd, en die zullen door harde feiten en bewijzen moeten worden vervangen.

In de tussentijd proberen we ook langs andere wegen de waarheid te achterhalen. Het is waar dat M-theorie zich nu ook over zwarte gaten ontfermt, maar hier lijken toch nog fundamentele moeilijkheden te huizen. *Stel dat je een heel klein zwart gat hebt en eist dat het gehoorzaamt aan zowel de wetten van de*

quantummechanica als de wetten van de zwaartekracht. Hoe omschrijf je dan zijn gedrag? Het venijn in deze vraag is dat je veronderstelt dat het zwarte gat in zijn geheel zich net zo zou moeten gedragen als een atoom of molecule in de theorie van de quantummechanica. Vanaf 1984 hield ik me met deze vraag bezig, maar het duurde lang voordat men het met mij eens was dat de vraag zo geformuleerd diende te worden. Sommigen dachten dat het zwarte gat iets fundamenteel anders is. Maar wat zou er zo anders aan zijn? Het zwarte gat zendt deeltjes uit net zoals heel veel radioactieve atoomkernen. Waarom mag het niet aan soortgelijke wetten gehoorzamen? We geloven nu dat het aan dergelijke wetten moet gehoorzamen, want er zal toch wel enige vorm van *law and order* bestaan.

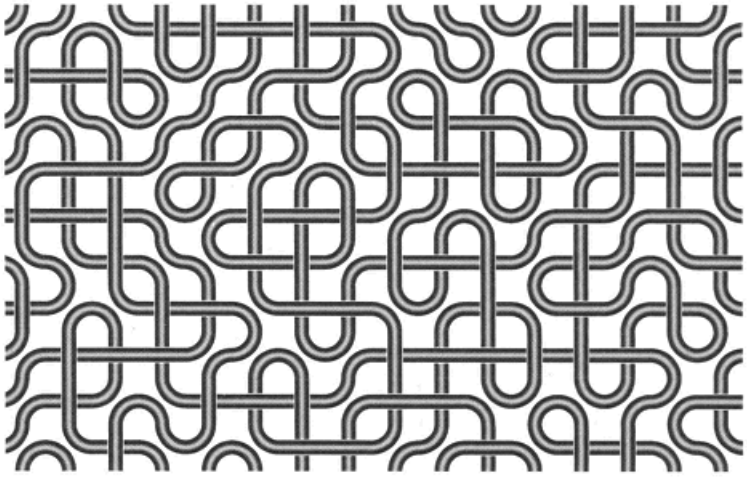
Eén resultaat dat je dan krijgt was een totale verrassing voor mij. Het bleek dat ik op bijna dezelfde wiskundige formules stuitte als in de snarentheorie! De formules voor de invangst en de emissie van deeltjes door een zwart gat lijken als twee druppels water op de Venezianoformule. Dat is vreemd, want er is hier geen sprake van snaren. Zolang ook deze theorie niet 'af' is kan ik heel moeilijk zeggen of en hoe de snarentheorie met de zwarte gatentheorie te combineren valt.

Stephen Hawking had heel andere opvattingen over zwarte gaten, zie figuur 30. Hij lanceerde destijds de theorie van het *ruimte-tijdschuim* die ik al eerder noemde. En ook dat is nog niet alles. Hij en verscheidene anderen, onder wie Sidney Coleman van Harvard, speculeerden dat er een rol is weggelegd voor 'wormgaten'. Een wormgat is een sliert ruimte-tijd die een verbinding vormt tussen ver uit elkaar gelegen gedeeltes van het heelal, of zelfs tussen ons heelal en 'andere heelallen'. Einsteins formulering van de zwaartekracht laat formeel het bestaan van zoiets raars toe. Maar, zo zeggen de onderzoekers, dan *moeten* ze ook voorkomen, want dat is de ervaring die we hebben opgedaan bij het werken met de quantummechanica: wat kan, moet. En u weet vast wel dat schrijvers van sciencefic-

tion dol zijn op wormgaten, want stelt u zich voor: u duikt in een wormgat en bent dan in *no time* ergens in Andromeda.

Volgens biologen zijn wormen nuttige dieren, en de gaten die ze maken zijn goed voor de grond. Welnu, voor de quantumzwaartekracht zijn deze wormgaten desastreus. Gelukkig kun je de wormgattheorie ook zodanig interpreteren dat de wormgaten absoluut onwaarneembaar zijn. Zo zou ik het ook liever willen houden. Ook hier zou je kunnen vermoeden dat wormgaten slechts een tussenfase naar een volledige theorie kunnen zijn. Zelfs als je niet in sciencefiction gelooft zou je je een wormgat kunnen voorstellen waardoor bijvoorbeeld een elementair deeltje spontaan van hier naar Andromeda verhuist. Maar de berekeningen van Hawking en Coleman gaven onder andere als uitkomst dat veel van deze verschijnselen fundamenteel *onberekenbaar* zijn. Weg dus law and order. Zulke theorieën waren gedoemd tot de vergetelheid.

Weer een andere benadering begon met een formele analyse van de quantumzwaartekracht, door Abhay Ashtekar aan de universiteit van Syracuse in de staat New York. Hierop voortbordurend vonden de jonge onderzoekers Lee Smolin en Carlo Rovelli dat de fundamentele ingrediënten van de ruimte-tijd niet punten, maar gesloten lussen zouden moeten zijn. Dat lijkt op Wat we bij de snarentheorie gezien hebben, maar dit is een oorspronkelijk heel andere benadering dan de snarentheorie. Volgens hen is het essentieel dat de lussen *in elkaar geknoopt* zitten, en is er buiten de lussen helemaal geen ruimte en tijd! Dit is een poging tot het construeren van een theorie die ik met veel belangstelling volg (zie figuur 33). Eindelijk iets dat lijkt op waar ik naartoe zou willen. In deze theorie zou alleen maar het aantal en de soort ‘knopen’ tussen al die lussen relevant zijn, en dat zijn zaken die je met simpele getallenreeksen zou kunnen weergeven. Net als losse punten in de ruimte, maar dan niet los! Toevallig, of misschien wel niet zo toevallig, is de theorie van de *knopen* een van de moeilijkste takken van de moderne wiskunde.



Figuur 33. Structuur van de ruimte volgens Ashtekar e.a.

Vanuit de snarentheorie was men ook al op het probleem van de knopen gestuit. Edward Witten ontdekte bij zijn analyse van de snaren allerlei nieuwe wiskundige theorema's over knopen en verdiende daarbij de gerenommeerde Fieldsmedaille. Als u dit alles maar dromerige tijdverspilling vindt, moet ik u vertellen dat ik nog maar de minder vreemde pogingen en benaderingen heb genoemd. Op werkbijeenkomsten over dit soort vragen die soms meer op brainstormingsparty's lijken, krijgen we soms nog veel gekkere zaken voorgeschoteld. Zo wordt er gefilosofeerd over quantumsprongen van het ene heelal naar het andere (meestal via wormgaten), over parallelle werelden in de ‘quantumkosmologie’, over werelden waar de natuurconstanten anders zijn dan bij ons, maar via wormgaten met elkaar en ons verbonden, en zelfs over de vraag of we een heelal kunnen laten ontstaan in een reageerbuisje. Maar voor dit soort zaken moet u niet bij mij zijn.

30 Heelalkunde

Toen ik de eerste versie van dit boek schreef, vond ik nog dat de leer omtrent het ontstaan van het heelal gewoon tot een ander vak behoorde: de sterrenkunde, en als het allereerste begin van ons universum al iets van doen heeft met de elementaire-deeltjestheorie, dan moest dat nog voornamelijk tot de sciencefiction worden gerekend. Thans echter wordt algemeen erkend dat de wereld van het allerkleinste en de wereld van het allergrootste nauw met elkaar zijn verweven zijn.

Natuurlijk kunnen wij ons de vraag stellen waar al die sterren en sterrenstelsels vandaan komen, hoe is alle materie ontstaan waar deze uit zijn gevormd. Waarom zijn er grote stukken van het ons omringende heelal praktisch helemaal leeg? Maar er zijn nog indringendere vragen. Waarom is de nachtelijke hemel zwart? Als er *oneindig veel* sterren zouden bestaan dan zou er in iedere richting waar je kijkt wel een ster moeten zitten, *en dan zou de hemel fel wit zijn*! In feite zouden wij op aarde door al dat licht verschroeien.

Een van de belangrijkste, en ook meest verbazingwekkende, vragen is: waarom is ons heelal zo verschrikkelijk groot, en hoe komt het dat het zo lang heeft kunnen blijven bestaan? Als je namelijk ‘zo maar’ probeert een model te beschrijven voor het ontstaan van het heelal, dan ontdek je dat het niet eenvoudig is goede wetten te formuleren die het heelal zo groot laten worden als het nu is.

Ook op deze punten roeren de snarentheoretici zich: hun theorie zou alles moeten kunnen verklaren, dus ook dit soort vragen kunnen beantwoorden - maar dat gaat nog van geen kant. Wel heeft de *sterrenkunde* zelf enorme vorderingen gemaakt. Met nieuwe generaties telescopen kan men nu veel verder in het heelal kijken dan nog maar pakweg tien jaar geleden. De vraag omtrent de kleur van de hemel is inmiddels wel be-

antwoord: de sterrenstelsels verwijderen zich van elkaar, en de verst weg gelegen stelsels verwijderen zich met een zo grote snelheid dat het licht dat zij uitzenden zeer wordt verzwakt. Bovendien: hoe verder we kijken, hoe meer we naar het verleden kijken, want het licht doet er lang over om ons te bereiken. Als we verder dan circa dertien miljard lichtjaren om ons heen kijken zien we geen sterrenstelsels meer, want dertien miljard jaar geleden bestonden die nog niet. Wel was er licht, maar dat is nu zo verzwakt dat de nachtelijke hemel heel donker is - niet zwart, maar donker.

Ons heelal moet zijn ontstaan door een grote knal, de *oerknal*. Ook hier is men het wel over eens. Maar wat gebeurde er toen precies? Om die vraag te kunnen beantwoorden moeten we allereerst de natuurwetten kennen, en de wetten waar het om gaat, dat zijn de wetten van de elementaire deeltjes. We proberen terug te rekenen naar het begin. Hoe verder je teruggaat, hoe hoger de temperatuur was in het heelal. Door die hoge temperatuur moeten de materiedeeltjes in het heelal heel hard tegen elkaar gebotst hebben. Vanaf het moment dat die botsingsenergie vergelijkbaar was met, of lager dan, de energieën waarvoor het standaardmodel aangeeft wat er kon gebeuren, heeft men een betrouwbaar beeld van de geschiedenis van het heelal.[1] Deze periode begint wanneer het heelal ongeveer een tienmiljardste seconde oud is.

Op dat moment had het heelal al heel veel structuur. Het heelal was veel homogener dan nu, en het was klein, wellicht slechts enkele centimeters, maar er zat al wel veel materie in; de druk was onvoorstelbaar hoog. Heel kleine variaties in de dichtheid zouden later leiden tot de sterren en de sterrenstelsels. Vragen die kosmologen zich nu stellen zijn: hoe is die materie erin ontstaan, waarom was er meer materie dan antimate-

1 Zie bijv. S. Weinberg, ‘The First Three Minutes’, Basic Books Inc., publ., New York 1977, ISBN: 0-465-02435-1.

rie (oorspronkelijk slechts een verschil van een deel op het miljard), en hoe zijn die dichtheidsvariaties totstandgekomen? Waarom waren die zo klein?

Een essentieel idee was geopperd door Alan Guth: We moeten aannemen dat vóór die ene tienmiljardste seconde het heelal een periode heeft gekend die we 'inflatie' noemen. Gedurende die 'lange' tijd van een tienmiljardste seconde waren onze wetten 'schaal-invariant'. U herinnert zich het begin van dit boek, waarin ik betoogde dat de natuur in onze wereld niet precies dezelfde wetten volgt als je een schaalvergroting beschouwt.

Welnu, gedurende zekere tijd moet dit wél zo geweest zijn. Het gigantische aantal atoomdeeltjes dat ons heelal nu kent kan alleen op die manier zijn ontstaan.

Dit nu is een uiterst belangrijke mededeling voor de deeltjesfysici, want dit wisten we nog niet. Het is feitelijk een aanwijzing die zegt dat 'de grote woestijn' toch betrekkelijk structuurloos is. Helaas is het nog verschrikkelijk moeilijk de gebrekkige gegevens die we hebben zo nauwkeurig te analyseren dat we de details van de woestijnwereld zouden kunnen achterhalen, maar er worden vorderingen gemaakt. Vanuit luchtballonnen en satellieten wordt nu de nachtelijke hemel nagemeten, en de temperatuurfluctuaties van de achtergrondstraling worden uiterst nauwkeurig vastgelegd. Weliswaar ontstond deze straling 'pas' toen het heelal al 300.000 jaar oud was, maar ze zegt toch heel veel over die mysterieuze dichtheidsfluctuaties van het allereerste begin. Die dichtheidsfluctuaties ontstonden als zuivere *quantumfluctuaties*! Het blijft voor mij wonderbaarlijk dat hele melkwegstelsels ontstaan kunnen zijn door een quantumonzekerheid in de dichtheid van een pril heelal-in-wording. Hopelijk zullen deze metingen en berekeningen ons verdere aanwijzingen verschaffen over de natuurwetten die toen van kracht waren.

Ook andere belangrijke aanwijzingen bereiken ons vanuit de

diepten van het heelal. Al eerder noemde ik de constatering dat er materie aanwezig lijkt te zijn die geen licht uitzet en niet meedoet met de processen waardoor sterren en planeten ontstaan; we weten nog niet op welke wijze deze materie aan het standaardmodel zal moeten worden toegevoegd. Dit is de zogenaamde ‘donkere materie’.

Maar er lijkt nog meer te zijn. Sommige sterren in het heelal lijken ouder te zijn dan de leeftijd van het heelal zelf, althans als je aanneemt dat de expansiesnelheid van het heelal ongeveer constant gebleven is. Deze discrepantie in de theorie voor het heelal verdween toen men uit waarnemingen van heel ver weg gelegen stelsels afleidde dat de expansiesnelheid van het heelal thans groter is dan in het begin: het heelal versnelt zich. Dit kan alleen als er ook nog ‘donkere energie’ aanwezig is; in wezen is dit een effect van de lege ruimte zelf op de gravitatiekrachten in het heelal, een term in Einsteins vergelijking voor de zwaartekrachtwet die Einstein ‘kosmologische constante’ noemde. De aanwezigheid van deze extra term is voor ons erg mysterieus. In onze ultieme theorie moet er een verklaring voor gevonden worden. Onze moeilijkheid is dat we het hier hebben over een krommingseffect van de ruimte dat pas over miljarden lichtjaren merkbare afwijkingen veroorzaakt, terwijl wij alleen kunnen uitrekenen hoe deeltjes van subatomaire afmetingen kromming in ruimte en tijd veroorzaken. Er is hier sprake van een gigantisch ‘fijnregelingsprobleem’.

31 De heerschappij van het allerkleinste

Of je je nu de allerkleinste structuren voorstelt als ‘supersnaren’, of in elkaar geknoopte stukjes wol zoals Ashtekar en zijn navolgers denken, of als je, zoals ik, gelooft dat op de allerkleinste afstandsschaal de zwarte gaten de dienst uitmaken, steeds lijkt het dat één conclusie onvermijdelijk is: de *hoeveelheid informatie* die je in een klein stukje ruimte kunt stouwen is beperkt. Nu weet iedereen die wel eens met computers heeft gewerkt dat je informatie kunt weergeven als series nullen en enen. Als er ‘interacties’ of ‘gebeurtenissen’ plaatsvinden dan worden die nullen en enen verwerkt tot een andere serie nullen en enen.

Toen James Maxwell in de negentiende eeuw zijn befaamde wetten voor de elektrische en magnetische velden had opgesteld, stelde ook hij zich voor dat er een ‘medium’ is, een soort raamwerk, tot de nok gevold met kleine radertjes, die elk bepalen hoe de veldsterkte ter plekke verandert onder invloed van de veldsterkte in de onmiddellijke omgeving. Tegenwoordig zouden we eerder aan een zeer krachtige computer denken, bestaande uit grote reeksen microprocessoren, maar het basisidee is hetzelfde: er zijn grote hoeveelheden getallen, die je alle zou kunnen schrijven als series nullen en enen, welke onder invloed van elkaar evolueren. De wereld waarin wij leven zou dus gelijken op één grote supercomputer.

Tegenwoordig echter wordt dat idee algemeen als onhoudbaar verworpen. Ieder boek over de fundamenten van de quantummechanica zal u vertellen dat dit een te eenvoudige voorstelling van zaken zou zijn. De quantummechanische natuurwetten, zo lezen we, zijn onverenigbaar met een ‘mechanische’ verklaring van wat er gebeurt. De toekomst wordt niet op een eenduidige, ‘deterministische’ manier bepaald door het verleden.

Men baseert deze sterling op het gedachte-experiment dat Einstein, Podolsky en Rosen hadden uitgedacht, en waarvoor de quantummechanica een uitkomst voorspelt die onverenigbaar lijkt met een deterministische theorie. John Bell van het CERN heeft dit later preciezer uitgewerkt in wiskundige stellingen. We kunnen ons dus een experiment voorstellen waarvoor de ons bekende quantummechanische natuurwetten zeer nauwkeurig voorspellen wat de uitkomst zal zijn. Geen enkele mechanische theorie kan die uitkomst reproduceren volgens Bell, althans als we ervan uitgaan dat in die theorie informatie zich niet sneller kan voortplanten dan het licht.[1]

Dit is nu weer zo'n ‘gaat-niet-steiling’, een stelling die je met zekerheid vertelt hoe je *niet* moet proberen een theorie op te zetten, omdat het niet lukken zal.

Zoals u misschien al gemerkt hebt, koester ik enige argwaan tegen gaat-niet-stellingen. Een soortgelijke stelling vertelde ons destijds dat je niet moest proberen interne symmetrieën tussen deeltjes te combineren met hun symmetrie in de ruimtetijd, dus dat het onmogelijk zou zijn symmetriemultipletten op te bouwen uit deeltjes met verschillende spin. En supersymmetrie dan? Dat was immers een grote succesvolle constructie van multipletten met verschillende spin? Tja, dat zat 'm in de kleine lettertjes van de gaat-niet-stelling: er was aangenomen dat je niet-fermionen met bosonen bij elkaar zet. Zulke kleine lettertjes vergeet men vaak te vermelden, zodat zulke stellingen ons er ten onrechte van weerhouden belangrijke mogelijkheden verder te onderzoeken.

En zo ook staan er in de stellingen van John Bell kleine lettertjes waarop men meestal geen acht slaat. Een van de mogelijke ontsnappingsroutes zoals ik die zie, is een theorie waarin

1 Later werden dit soort experimenten daadwerkelijk uitgevoerd. Zoals iedereen verwachtte, zijn de voorspellingen van de quantummechanica uitgekomen.

datgene wat wij de ‘lege ruimte’ noemen allerminst leeg is maar een wirwar van activiteit vertoont. Mijn collega's zullen me hierop aanvallen. Het is geheel geen eenvoudige zaak om een goed werkende ‘mechanische theorie achter de quantum mechanica’ op te zetten, zelfs als je ‘vacuümfluctuaties’ in beschouwing neemt. Ik weet ook niet hoe het moet, maar vermoed slechts dat hier een ontsnappingsweg is.

Toen ik eens in een publicatie voorzichtig uiting gaf aan deze opvatting bracht me dit in contact met een groep mensen die er, geheel los van de gevestigde opvattingen in de natuurkunde, ook van overtuigd zijn dat de natuur een informatieverwerkende machine is. Hun woordvoerder is Edward Fredkin. Hij is geen natuurkundige maar computerexpert (en een geniale uitvinder). Met computers is al heel veel gerekend aan modellen waarin luchtstromingen, of verdeling van vis in de oceaan, of noem maar op, worden voorgesteld als series van nullen en enen. Men noemt zo'n computermodel ook wel een *cellulaire automaat*. In een groot aantal ‘cellen’ bewaren we getallen die uit nullen en enen bestaan. Op de maat van een klok veranderen de getallen in iedere cel volgens een vast voorschrift, uitgaande van wat de getallen waren in die cel en zijn naaste buren.

Fredkin is ervan overtuigd dat ook onze werkelijke wereld niets anders is dan een reusachtige cellulaire automaat. Men kan nu op de monitor van een computer de gebeurtenissen in zulke automaten volgen. Fraaie kleurpatronen ontrollen er voor onze ogen. Door deze patronen en hun wetmatigheden te bestuderen kreeg Fredkin het idee dat ook quantummechanische verschijnselen en krachten die doen denken aan de zwaartekracht in deze patronen zouden kunnen ontstaan.

Maar dit soort claims zou hard gemaakt moeten worden en dat kan Fredkin niet. Wel maakt hij een merkwaardige en belangrijke opmerking: *het doet er niet zo precies toe wat het programma van de automaat is*! Want, zo zegt hij, zodra het pro-

gramma voldoende ‘wendbaar’ is, kun je met iedere cellulaire automaat iedere andere automaat ‘simuleren’. Je kunt er als het ware kleine computertjes van maken waarmee iedere andere automaat kan worden nagebootst. Hij spreekt daarom van de ‘universele’ cellulaire automaat. Ik ben één van de weinige theoretisch-fysici die zo'n beeld van de natuur als cellulaire automaat niet zonder meer afwijst, omdat het in strijd met de quantummechanica zou zijn. Als je de patronen op het computerscherm volgt zie je al gauw dat deze geweldig chaotisch worden. Als er dan toch nog wetmatigheden optreden op heel grote schaal (groot vergeleken met de grootte van de cellen) dan zouden alleen de wetten van de statistiek daar misschien van toepassing kunnen zijn. En misschien is dat wel wat wij nu quantummechanica noemen.

Maar ja, als je meent met de ‘universele cellulaire automaat’ de theorie van alle natuurverschijnselen gevonden te hebben dan heb je, naar ik vrees, het kind met het badwater weggegooid. Want hoe vinden we nu de eigenschappen van de elementaire deeltjes hieruit terug? Als een blinde zijn we onze weg naar het allerkleinste vervolgd en al tastend voelen we dat de weg ophoudt te bestaan. De weg terug zijn we kwijt. De auto stond geparkeerd ergens langs de snelweg door de woestijn.

De natuur als informatieverwerkende machine. Is dit een illusie? Is deze gedachte slechts een voortvloeisel uit onze huidige cultuur, we leven immers in een maatschappij waarin ‘informatie’ steeds belangrijker wordt? De toekomst zal het leren. Want, áls er een ultieme natuurwet is die alleen met nullen en enen werkt, dan zal de mensheid daar vroeg of laat wel achter komen, zo veel vertrouwen in het menselijk vernuft heb ik nog wel.

Stel nu eens dat dit zo is, dat er een ‘Theorie van Alles’ is waar niet meer aan te tornen valt. Een fundamentele natuurwet waarvan de uiteindelijke formulering zo eenvoudig is dat er geen veranderingen meer mogelijk zijn. Alle eigenschappen van de materie, alle verschijnselen in de ruimte-tijd, alle na-

tuurwetten zouden uit deze fundamentele natuurwet af te leiden zijn. Wat voor effect zou dit wel niet hebben op de natuurkunde, en uiteindelijk ook op onze samenleving?

Dat effect zou maar klein zijn. Op één na houden alle takken van de natuurkunde zich namelijk *niet* bezig met het vinden van de T.v.A. Het beschrijven van atomen, moleculen, materialen, gassen, vloeistoffen en allerlei andere hoedanigheden van de materie vraagt steeds weer andere wiskundige methoden. Men realiseert zich dan heel goed dat de bouwstenen van deze objecten aan basiswetten gehoorzamen die in principe bekend zijn, maar men onderzoekt dan hoe deze wetten samenspannen om de verschijnselen teweeg te brengen die men waarneemt. En op dit soort vragen geeft de T.v.A. helemaal geen antwoord.[1] Dus al deze takken van de natuurkunde blijven wat ze waren. Ook voor de elementaire deeltjes op allerlei verschillende niveaus zal men dan de vragen precies zo stellen als voorheen. Ofwel: het eindpunt van onze weg naar het allerkleinste mag dan bekend zijn, maar hoe precies loopt het traject van *A* naar *B*? Het beantwoorden van deze vragen zal moeilijk blijven, en groots opgezette laboratoria voor vernuftige experimenten zullen nodig en nuttig blijven. Daarom: op de natuurkunde in zijn geheel zou het effect van een T.v.A. heel gering zijn.

Wat de uitwerking op onze samenleving betreft, ook deze zal in eerste instantie gering zijn. Ik koester de, waarschijnlijk zeer naïeve hoop (illusie?) dat de mensheid haar plaats in de wereld, het heelal, een beetje beter zal gaan begrijpen, dat meer mensen eindelijk zullen gaan inzien dat er in deze wereld geen plaats is voor allerlei metafysische zaken.

1 De benaming ‘Theorie van Alles’ is dus uiteraard helemaal fout. Het is wel de vertaling in het Nederlands van ‘Theory of Everything’, waarmee de enthousiaste aanhangers van superzwaartekracht en supersnarentheorie, met typisch Amerikaanse bescheidenheid, de pers bestookten.

Het vinden van een T.v.A. zou een weergaloos succes van de natuurkunde zijn, en je zou kunnen hopen dat mede daardoor de natuurkundige methoden, uiteraard die welke succesvol waren, ook in andere vakgebieden navolging zullen vinden. Ik zeg dit met aarzeling, omdat je hiervan zo veel totaal verkeerde voorbeelden ziet. Als men in de psychologie of sociologie gaat praten over *energie* of *entropie*, wekt men ten onrechte de indruk dat daar deze begrippen aan dezelfde wetten voldoen als in de natuurkunde, of ook maar bij benadering met dezelfde nauwgezetheid zijn gedefinieerd.

Realistischer was de reactie van Richard Feynman toen men hem vroeg wat hij verwachtte van een ‘Theorie van Alles’.

Feynman zei niet te geloven dat die er ooit komen zou. ‘Maar,’ zei hij, ‘als ze er komt dan verwacht ik dat er net zoiets gebeurt als wat er met een bergtop gebeurt nadat hij voor de eerste keer door moedige en vakkundige bergbeklimmers is bedwongen.’ Deze bergbeklimmers hebben dan waarschijnlijk ook voor het laatst kunnen genieten van de immense pracht van de natuur daar. Want zij maken de eerste begaanbare weg. Daarna komen er meer wegen en een kabelbaan, en dan krijg je de toeristen. Comfortabel in het pas aangelegde luxueuze restaurant boven op de top geven zij dan hun visie. De bergbeklimmer herkent zijn ontdekking niet meer vanwege de hopen vuilnis die eraan zijn toegevoegd.

Misschien zal niemand de lange weg naar het allerkleinste in zijn geheel kunnen overzien. Misschien zal het nog vele eeuwen duren voordat de mensheid die weg in kaart zal hebben gebracht. Misschien bestaat die weg wel, maar zullen we hem vanwege onze beperkte intelligentie nooit ontdekken. Zoals ik al eerder zei, de kans op dit laatste lijkt mij klein.

Is misschien de weg naar het kleinste oneindig lang? Bestaat er geen ‘kleinste afstand’? Juist omdat men al verschillende keren eerder in de geschiedenis heeft gemeend dicht bij de eindgrens van de natuurkunde te zijn, en omdat dit nooit juist is ge-

bleken, is men algemeen gaan accepteren dat een fundamentele universele theorie wel nooit mogelijk zal zijn. Het zou van weinig wijsheid getuigen te menen dat zo'n ‘steen der wijzen’ zomaar voor het oprapen zou liggen.

Maar laten we nu eens die aura van de ‘steen der wijzen’ trachten weg te nemen. Een universele theorie zou helemaal niet betekenen dat dan ook meteen alle natuurverschijnselen verklaard zouden zijn. Het zou een nogal formele maar wel exacte reeks van vergelijkingen zijn waarvan we zouden weten dat alle verschijnselen eraan gehoorzamen. De vragen omtrent de verklaring van de verschijnselen zouden dan veranderd zijn in wiskundige, ‘rekentechnische’ vragen. Dat zijn ze voor het merendeel nu al, en ze worden er dus geenszins eenvoudiger op.

Ook wil ik de schijn wegnemen dat een simpele exacte natuurwet onze wereld zo eenvoudig, zo ‘klein’ zou maken dat er geen plaats meer zou zijn voor ‘gevoel’, ‘vrije wil’, ‘leven’, of zoiets als ontzag en respect voor het immense van ons heelal. De afmetingen van het heelal moeten getallen zijn van de orde van 10^{54} Plancklengtes. Het volume is dat getal tot de derde macht, en de ouderdom is ook zoiets als 10^{54} Plancktijdstapjes. Deze getallen bevatten ‘slechts’ 54 cijfers en lijken daarom klein, maar in werkelijkheid zijn zulke getallen zo immens groot dat er meer dan genoeg plaats is voor alle wonderlijke zaken die ons heelal rijk is.

De enige echte weerstand tegen een ‘Theorie van Alles’ is dan nog van religieuze aard. Ik meen dat dan deze keer de geschiedenis ook als volgt kan worden gelezen[1]: de mensheid heeft voortdurend ontdekkingen gedaan die voorheen voor onmogelijk werden gehouden. Ziektes, bijvoorbeeld, waren de instrumenten van de goden totdat de medici ontdekten dat er wat

1 Mijn stelling is namelijk: de geschiedenis herhaalt zich, en zal dat blijven doen, maar niet op een voorspelbare manier.

tegen kon worden gedaan. Ten tijde van de grote ontdekkingsreizen bleef men dromen van nog nooit ontdekte continenten en volkeren en leek het ondenkbaar dat er een tijd zou kunnen aanbreken waarin de mensheid iedere vierkante meter van de globe in kaart zou hebben gebracht. De bewegingen van de hemellichamen waren ook het domein van de goden (of die ene God) totdat ontdekt werd dat je ze begrijpen kon en dat deze hemellichamen niet uit wezenlijk andere materie bestaan dan onze eigen aarde. En zo ook is de Universele Vergelijking voor alle natuurverschijnselen thans het domein van de goden. Voor eeuwig? Wie zal het zeggen?

Bij de derde, herziene druk

Diverse collega's hebben mij op kleine onjuistheden in de eerste druk gewezen, die ik nu heb gecorrigeerd. Bij deze mijn dank aan hen. Voorts werd er van diverse kanten opgemerkt dat het toch erg nuttig zou zijn geweest als er een register zou zijn. Een beknopt register en een verklarende woordenlijst heb ik nu ook toegevoegd, dit ondanks mijn standpunt dat dit boek niet is bedoeld als leerboek, en als u eventjes iets niet snapt of vergeten bent, moet het mogelijk zijn verderop de draad weer op te vatten, ook zonder het register en de woordenlijst te raadplegen. Het register en de woordenlijst bevatten bijna alleen namen en begrippen die verscheidene keren in het boek voorkomen, omdat deze anders veel te lang zouden zijn geworden.

Bij de vierde, herziene en bijgewerkte druk

Verdere ontwikkelingen hebben zich voorgedaan waardoor ons inzicht in de wereld van de allerkleinste bouwstenen steeds scherper werd, maar het beeld dat ik in dit boek heb geschetst, verandert daar niet wezenlijk door. Slechts kleine correcties waren nodig. Quarks van het type ‘top’ zijn nu experimenteel gedetecteerd, waardoor het standaardmodel nu bijna volledig is (het wachten is nog op de directe bevestiging van het Higgsdeeltje, waarvan we nog steeds niet weten hoe zwaar het is).

Recente berichten in de media als zou men een ‘substructuur’ van de quarks hebben ontdekt, zijn nog volstrekt prematuur, en we leggen die nog gewoon naast ons neer. De theorie die zegt dat er bij hogere energieën een supersymmetriestructuur moet zitten in de elementaire deeltjes, wint steeds meer aanhang. Wat dit betreft kijkt men met spanning uit naar de resultaten van de Europese deeltjesversneller LHC (Large Hadron Collider) die vanaf omstreeks 2006 te verwachten zijn. Voorlopig hoef ik echter nog niets te herschrijven.

Bij de zesde, herziene en bijgewerkte druk

Nadat de schrijver dezes een eerzame onderscheiding ten deel is gevallen voor zijn bescheiden bijdrage tot de ontwikkeling van de ideeën die hier beschreven zijn, meende hij nogmaals aanpassingen te moeten aanbrengen. Het standaardmodel staat als een huis, zodat de eerste helft van het boek nauwelijks wijzigingen behoefde. Er zijn wat fraaiere figuurtjes aan toegevoegd. Maar met veel energie trachten de onderzoekers de diepere wortels van het standaardmodel uit te graven, en er nieuwe elementen aan toe te voegen. Wat dit betreft stapelen de nieuwe bevindingen zich op.

De supersnarentheorie vindt nog steeds volop aanhang, ook al heeft men nu het accent verlegd naar wat nu ‘M-theorie’ heet, zijn er allerlei soorten membranen (de ‘p-branen’) aan toegevoegd, en erkent men nu ook het belang van de ‘zwarte gaten’ in deze theorieën. Strikt genomen zijn alle deeltjes, snaren en embranen nu ‘zwart’. Nog steeds worden deze ideeën omgeven door een waas van geheimzinnigheid, maar ze zijn belangrijk genoeg om er extra aandacht aan te besteden. Ook de kosmologie, of ‘heelalkunde’ mocht nu niet meer ontbreken.

Gerard 't Hooft, augustus 2002

Verklarende woordenlijst

Ab initio (Ln) Vanaf het begin.
Ångstrom 10^{-10} meter.
Antideeltje Soort deeltje dat complementair is aan een ander. Heeft dezelfde massa en spin, maar elektrische lading en andere quantumgetallen zoals S, L, en B zijn tegengesteld.
Atoom Bouwsteen van de scheikundige elementen. Bestaat uit een kern die is opgebouwd uit protonen en neutronen, met daaromheen draaiend elektronen.

Baryon Groepsnaam voor deeltjes die gevoelig zijn voor de sterke kracht (hadronen) en tevens halftallige spin hebben. Opgebouwd uit drie quarks.
Baryongetal (B) Aantal baryonen minus aantal antibaryonen. Of het aantal quarks minus antiquarks gedeeld door drie.
Bose-Einsteincondensatie Treedt op wanneer een grote concentratie van bosonen de ruimte een lagere energie kunnen geven dan zonder die bosonen.
Boson Groepsnaam voor alle deeltjes met heeltallige spin. Vertoont collectief gedrag.
Bottom Ook wel 'beauty' genoemd, quantumgetal dat de aanwezigheid van een 'bottom-quark' (*b*) aangeeft. Het bottom-quark is vergelijkbaar met het *d*-quark en het *s*-quark, maar is veel zwaarder.

C *Zie* ladingsconjungatie
CERN Europees laboratorium voor (sub)nucleair onderzoek te Genève.
Charme Quantumgetal dat de aanwezigheid aangeeft van het *c*-quark.
Constante van Planck, h Evenredigheidsfactor tussen energiequantum *E* en de frequentie *v*, zodat $E = h \times v$, *en* $h = 6{,}626068 \times 10^{-34}$ Js.
Coördinaten Getallen die de positie van een punt in een ruimte kunnen aangeven, of de grootte en de richting van een vector.
Coulombkracht Elektrostatische kracht tussen twee elektrische ladingen. Evenredig met het product van de ladingen en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand.

Diraczee Oneindige sloot van onzichtbare deeltjes met negatieve energie die de lege ruimte bevolken volgens de oorspronkelijke Diractheorie. De afwezigheid van zo'n deeltje ervaren we pas als een fysisch waarneembaar antideeltje.

Elektrische lading Eigenschap van een deeltje waardoor de elektromagnetische kracht erop kan inwerken.

Elektrisch veld Krachtveld veroorzaakt door aanwezigheid van elektrische ladingen. Beïnvloedt de beweging van een deeltje met elektrische lading.
Elektron Licht, elektrisch negatief geladen, deeltje dat in een atoom beweegt. Het elektron is het lichtste lepton.
Energie Bestaat (voor een deeltje met rustmassa *M* en snelheid *v*) uit bewegingsenergie (ongeveer $\frac{1}{2}Mv^2$), interne energie (Mc^2) en potentiële energie (bepaald door aanwezige velden).
Èta (η) Meson bestaande uit een quark en een antiquark. Spin 0. Vrij stabiel hoewel het door middel van de sterke kracht uiteen kan vallen.

Fermion Groepsnaam voor alle deeltjes met halftallige spin (spin = ½, 3/2, 5/2, et cetera).
Feynmanregels Rekenvoorschrift in de veldentheorie voor elementaire deeltjes waarbij gebruikgemaakt wordt van diagrammen.
Foton Energiequantum van elektromagnetische straling.
Fonon Energiequantum van geluid; van belang in materie bij lage temperatuur.

Generatie Van elementaire deeltjes: de ‘gewone’, lichte deeltjes hebben ieder een zwaardere en een nog zwaardere variant, zodat er drie generaties van deeltjes zijn.
GIM-mechanisme Idee van Glashow, Iliopoulos en Maiani dat er een vierde quark, ‘charm’, moest bestaan omdat dan de afwezigheid van bepaalde zwakke krachten beter kon worden begrepen.
Gluon Overbrenger van de kleurkracht tussen quarks. Heeft spin 1 en rustmassa o. Heeft acht mogelijke kleurtoestanden.
Gravitino IJkdeeltje van de superzwaartekrachttheorie, met spin 3/2.
Graviton Energiequantum van zwaartekrachtsgolven.

Hadron Groepsnaam voor alle deeltjes die gevoelig zijn voor de sterke kracht. Omvat de baryonen en de mesonen.
Higgsdeeltje Boson met spin 0 dat, niet direct waarneembaar, in grote hoeveelheden de lege ruimte bevolkt, en zo het Higgsmechanisme teweegbrengt.
Higgsmechanisme (Higgs-Kibblemechanisme) Asymmetrische structuur van de lege ruimte waardoor vele deeltjessoorten massa krijgen.

IJktransformatie Wijziging in de omschrijving van een situatie die de fysisch waarneembare werkelijkheid niet verandert.
IJkinvariantie Het niet veranderen bij een ijktransformatie.

IJkveld Veld van een ‘ijkboson’, een deeltje dat een kracht overbrengt vergelijkbaar met de elektromagnetische kracht, en waarin ‘ijktransformaties’ een belangrijke rol spelen. *Zie ook* ‘Yang-Millstheorie’.
Impuls Massa x snelheid
Impulsmoment Mate van draaibeweging van een deeltje of groep van deeltjes. Te meten in gehele of halftallige veelvouden van $h/2\pi$.
Interferentie Verschijnsel dat optreedt bij golfbewegingen, met name in de quantummechanica. Als een proces langs verschillende wegen kan lopen, kunnen de twee mogelijkheden elkaar versterken (positieve interferentie) of tegenwerken (negatieve interferentie).
Isospin I_3 Behouden quantumgetal bij botsingsprocessen.

Jet Samengepakt groepje pionen en nucleonen zoals dat dikwijls bij zeer energetische botsingsprocessen ontstaan kan. Een hoogenergetisch quark of gluon wordt altijd in een jet omgezet.

Kaluza-Klein-theorie Theorie van de opgerolde dimensies.
Kaon Het lichtste meson dat een vreemd quark s of antiquark $\bar{s}$ bevat. Kan elektrisch geladen of neutraal zijn.
Kern Centraal deel van een atoom. Opgebouwd uit protonen en neutronen.
Kleurkracht De sterke kracht waarmee quarks elkaar aantrekken. De overbrenger is het gluon.
Kopenhaagse interpretatie Algemeen gangbare opvatting volgens welke de quantummechanica alle mogelijke informatie levert omtrent kansverdelingen van deeltjes. Beschrijvingen van verschijnselen in termen van golven en die in termen van deeltjes zijn ‘complementair’.
Koppelingsconstante Natuurconstante die de sterkte van een kracht of interactie bepaalt.

L *Zie* Leptongetal.
Ladingsconjungatie (C) Het vervangen (om te vergelijken) van een deeltje door diens antideeltje (waarvan de elektrische lading tegengesteld is).
Lepton Groepsnaam voor deeltjes die de sterke kracht niet voelen en spin ½ hebben.
Leptongetal (L) Aantal leptonen minus aantal antileptonen.

Magnetisch dipoolmoment Mate waarin een elektrisch geladen deeltje met spin als een magneet werkt. Lichte deeltjes zoals een elektron zijn veel sterkere magneten dan zwaardere zoals het proton.
Magnetisch veld Krachtveld veroorzaakt door bewegende elektrische ladin-

gen of elektrische stromen. Beïnvloedt een elektrisch geladen deeltje als dit een grote snelheid heeft.
Massa Mate waarin een object volhardt in zijn beweging (traagheid). Uitgedrukt in grammen (g), kilogrammen (kg) of MeV/c^2 (1 MeV/c^2 = 1,78268 × 10^{-27} g).
Maxwelltheorie Beschrijving van de vergelijkingen waaraan elektrische en magnetische velden voldoen.
Meson Deeltje met heeltallige spin en gevoelig voor de sterke kracht (hadron). Opgebouwd uit een quark en een antiquark.
Micron 1/1000e millimeter.
Molecule Kleinste eenheid van een scheikundige stof. Samengesteld uit verscheidene atomen.
Multiplet Groepje van deeltjessoorten met vergelijkbare eigenschappen. Zo vormen het proton en neutron een doublet, en de drie pionen een triplet.
Muon Positief of negatief geladen deeltje met spin ½, ongeveer 200 maal zo zwaar als een elektron. Net als het elektron is dit een lepton.

Naakt deeltje Deeltje ontdaan van de wolk van andere (niet direct waarneembare) deeltjes die er meestal vlakbij zitten. Idealisatie van een puntdeeltje.
Neutrino Zeer licht deeltje met spin ½ en elektrisch neutraal. Doordat het de sterke kracht niet voelt is het zeer inert. Behoort tot de leptonen.
Neutron Elektrisch neutraal bestanddeel van atoomkernen. Valt gemiddeld in een kwartier uiteen in een proton, elektron en neutrino.

Pariteit P *Zie* Spiegelsymmetrie.
Pauli-uitsluitingsprincipe Beginsel dat zegt dat geen twee fermionen in dezelfde toestand mogen zitten. Dit impliceert dat hetzij hun spin verschillend georiënteerd moet zijn, hetzij ze op enige afstand van elkaar moeten blijven.
PC-symmetrie Gelijkenis tussen een deeltje en het spiegelbeeld (P) van zijn antideeltje (C).
Pion Deeltje met een massa tussen die van het elektron en proton in. Overbrenger van de sterke kracht tussen hadronen. Spin 0. Kan elektrisch geladen of elektrisch neutraal zijn.
Planckschaal Eenheden voor lengte (10^{-33} cm), massa (21μg) en tijd (10^{-44} sec) zodanig dat in deze eenheden gemeten de lichtsnelheid *c*, de constante van Planck, *h*/2π, en de zwaartekrachtconstante *G* alle gelijk zijn aan één.
Positron Antideeltje van het elektron.
Proton Positief elektrisch geladen bestanddeel van iedere atoomkern. Tevens het lichtste, en daarom het enige stabiele baryon.

Quantummechanica Leer van de bewegingen van alle kleine en lichte deeltjes, waarin kansverdelingen een essentiële rol spelen. Energie, spin en vele andere eigenschappen van deeltjes zijn hierdoor ‘gequantiseerd’.
Quantumchromodynamica Theorie voor de kleurkrachten in een hadron. Yang-Millstheorie gebaseerd op de wiskundige groep SU(3).
Quantumelektrodynamica Theorie voor de elektromagnetische krachten tussen elektronen.
Quark Bouwsteen van de hadronen. Fermion met spin ½. Kan niet in geïsoleerde toestand bestaan. Er zijn verschillende soorten, *u, d, s, c, b* en *t*.

Renormeren Procedure die neerkomt op het herdefiniëren van de fundamentele natuurconstanten in een theorie, zodanig dat de waargenomen verschijnselen er goed door worden weergegeven. Dikwijls lijken dan de oorspronkelijke getallen oneindig te worden.
Resonantie Zeer instabiel deeltje. De tijdelijke vorming van zo'n deeltje veroorzaakt een piek in het aantal botsingsprocessen bij een bepaalde energie die lijkt op een resonantiecurve.
Rho-deeltje (ϱ) Instabiel meson met spin 1 en massa kleiner dan het proton. Resonantie. Kan elektrisch geladen of neutraal zijn.
Rustmassa Massa van een deeltje als het in rust verkeert. Deeltjes met snelheden in de buurt van de lichtsnelheid lijken een grotere massa te hebben.

S *Zie* Vreemdheid.
Sigma(σ)-model Oorspronkelijk bedoeld als model voor pionen en nucleonen, later ook voor andere systemen gebruikt.
S-matrix Formule die de kansverdeling van deeltjes na een botsing (‘Streuung’) beschrijft.
Snaartheorie Stelt de deeltjes voor als elementaire stukjes (zeer strak gespannen) ‘touw’ in plaats van puntvormig. Pas als dit touw gaat trillen of draaien kan het een deeltje voorstellen.
Spiegelsymmetrie (P) Mate van gelijkenis tussen een deeltje of botsingsproces en diens spiegelbeeld.
Spin Draaibeweging van deeltjes. Preciezer: impulsmoment; gemeten in veelvouden van $h/2\pi$ (h is de Constante van Planck) is dit heeltallig (0, 1, 2, ...) of halftallig (½, 3/2, 5/2, ...).
Sterke kracht Krachtwerking tussen alle hadronen; geeft deze hun vorm.

Tau Nieuw lepton, vergelijkbaar met elektron of muon, maar veel zwaarder.
Top Ook wel ‘truth’, quantumgetal dat de aanwezigheid van het ‘top-quark’ aangeeft. Tegenhanger van ‘bottom’ of ‘beauty’.

Vacuüm Lege ruimte.
Vacuümpolarisatie Verandering van de eigenschappen van de lege ruimte door de aanwezigheid van een sterk veld, welk de deeltjes en antideeltjes in de Diraczee kan beïnvloeden.
Vector Fysische variabele die zowel een grootte als een richting heeft. Ook voor te stellen als een reeks van getallen (bijvoorbeeld drie getallen) die de coördinaten vormen.
Veld Een verschijnsel dat van plaats en tijd afhangt, zoals luchtdruk, temperatuurverdeling et cetera. Op de oppervlakte van de zee is de waterhoogte ook een ‘veld’. In een veld zitten dikwijls golfbewegingen.
Veldvergelijkingen De wetten die de tijdsafhankelijkheid van een veld bepalen.
Vreemdheid Quantumgetal S dat voor hadronen zodanig is gedefinieerd dat bij een botsingsproces de totale optelling van deze getallen vóór en na de botsing dezelfde blijft. Aantal anti-quarks van type $\bar{s}$ minus aantal quarks van type *s* in een hadron.

W-deeltje Elektrisch geladen drager van de zwakke kracht, ook wel ‘intermediair vectorboson’ genoemd.

Yang-Millstheorie Uitbreiding van de Maxwelltheorie voor elektromagnetisme. Er zijn minstens drie soorten elektrische en magnetische velden en er is een ijkprincipe.
Yang-Millsveld *Zie* IJkveld.

Z^0-deeltje Elektrisch neutrale drager van de zwakke kracht.
ZIZO's ‘Zwak Interagerende Zware Objecten’, Engels: ‘WIMP's’, theoretisch denkbare deeltjessoort(en) die de ruimte tussen sterren en sterrenstelsels zouden bevolken en zo verantwoordelijk kunnen zijn voor de sterke zwaartekrachtwerking tussen deze stelsels.
Zwaartekracht Kracht waarmee zware objecten elkaar aantrekken. Evenredig met het product van de twee massa's en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand.
Zwakke kracht Krachtwerking tussen alle bekende deeltjes. Zeer zwak en korte reikwijdte.

Register

achtvoudige weg 65
Anderson, Carl D. 75
antideeltje 46, 61-63, 167-168, 195
Ashtekar, Abhay 242-243, 248

B zie baryongetal
Balavin, Alexander 168
Bardeen, John 98
baryon 44, 46, 48
baryongetal (*B*) 48, 54, 64, 80, 171
beauty *zie* bottom
behoudswet 48-49, 59, 72, 80, 90, 142, 163
Bell, John 30, 85, 90, 249
Bjorken, James D. 84, 120
Bohr, Niels 23-24, 27, 29
Bose-Einsteincondensatie 98-100, 102, 108-109, 113, 138, 150
boson 44, 46, 187
bottom 151, 159, 166
Broglie, Louis-Victor de 23
Brout, Robert 100

C zie conjugatie
Cabibbo, Nicola 90
CERN 42, 83-85, 90, 116, 133, 152, 154, 156, 177, 249
Chandrasekhar, Subrahmanyan 227, 230
charme 84, 114-115, 118, 142, 145-146, 149-150, 159
Christenson, James 62
Coleman, Sidney 241-242
conjugatie *C* 62-63
Cooper, Leon N. 98
Cooperpaar 98-99
Coulombkracht 21
Cronin, James 62-63

delta-resonantie 53-55, 79, 189
De Witt, Bryce 93-94, 109, 207
Dicke, Robert 182
Dirac, Paul 27, 73-75, 135, 167-168, 195
donkere materie 183, 247
down 151, 159
Dyson, Freeman 75

Einstein, Albert 23, 27, 30-35, 37, 210, 247, 249
elektromagnetische kracht 36, 46-47, 49, 52, 72-73, 86, 95, 136, 144, 148, 150, 195
elektromagnetisme 36, 45, 90, 210, 212
elektron 21-24, 27, 38-39, 42-45, 47, 70-76, 80-81, 84, 90, 140-141, 144, 152-153, 188, 190-195
elektrostatische kracht *zie* Coulombkracht

Englert, François 100
Eötvös, Loránd 182
èta 146, 166-167, 169

Faddeev, Ludwig D. 94, 110, 207
Faissner, Hellmut 117
Fermi, Enrico 45, 52, 82
Fermilab 156, 158
fermion 44, 46, 113, 160-161, 186-187, 197
Ferrara, Sergio 185

Feynman, Richard 45, 67, 75, 82, 91-94, 103, 109, 120, 207, 216-217, 253
Feynmandiagram 199, 215-216
Feynmanregels 93, 103, 109
Fitch, Val 62-63
Fitzgerald, G.F. 33
fonon 97-98
foton 23, 36, 38-39, 44-46, 61, 70, 73-75, 112, 142, 187
Fradkin, Efim 207
Fredkin, Edward 250
Freedman, Daniel 188
Fritzsch, Harald 124

Gatto, Raoul 184
Gell-Mann, Murray 45, 48, 65-68, 82, 90-92, 107, 124
generatie 160-161, 166, 197, 202
Georgi, Howard 135, 196-198, 201
Georgi-Glashowmodel 136-137
GIM-mechanisme 84, 114, 118, 146
Glashow, Sheldon 84, 114-115, 135, 150, 197-198, 201
gluon 53, 125, 187, 190-191, 197
Goldstone, Jeffrey 102
Goldstoneboson 192
Goldstonedeeltje 102-103, 108, 166
Goudsmit, Samuel 43
gravitino 114, 189, 206
graviton 37, 114, 159, 161, 181-182, 189, 205-207, 218, 220
Green, Michael 219
Groot, Sybren R. de 70
Gross, David 123, 220
Guth, Alan 246
Gypsy 140-142, 145-148

hadron 46-48, 52-55, 70, 81, 90-91
Hawking, Stephen 208, 229-232, 236, 241-242
Hawkingstraling 230-231, 233
Heisenberg, Werner 27
Higgs, Peter 100, 102
Higgsdeeltje 100, 102, 151, 156-162, 181, 187, 193, 201
Higgs-Kibblemechanisme 102-103, 106-107, 109, 113, 125, 128-129
Higgsmechanisme 151, 188
Higgsveld 100, 102, 161, 201

ijkinvariantie 87-89, 91-92, 96, 103, 110
ijktheorie *zie* Yang-Millstheorie
ijktransformatie 87-89, 100, 206
ijkveld 98, 126, 160, 195, 197, 212
Iliopoulos, John 84, 114, 123, 150
instanton 169-171
isospin *I3* 49, 54, 57, 59, 65, 72, 80, 119

Jarlskog, Cecilia 61

jet 131-132

Kaluza, Theodor 210, 212, 217, 219
Kamiokande 175
Kampen, Nico G. van 79-80
kaon 43, 56-59, 61-62
Kibble, Thomas 102
Klein, Oskar 210, 212, 217, 219
Koba, Ziro 125
Kramers, Hans 79
Kronig, Ralph 79

Lee, Benjamin 108-110, 112, 136
Lee, Tsung Dao 60
LEP 182
lepton 44, 46-48, 70, 72, 81, 90, 113, 152-153, 177, 187, 191, 214

levensduur 50-55, 57, 81
Lévy, Maurice 90, 104
Lorentz, Hendrik Antoon 33

magnetisch dipoolmoment 73
magnetisch moment 75-76
magnetische monopool 133-138, 235
Maiani, Luciano 84, 114, 150
Maldacena, Juan 237
Mandelstam, Stanley 93-94, 109-110, 207
Marshak, Robert 82
Maxwell, James Clerk 18, 35-36, 72, 195, 248
Meer, Simon van der 154
membraan 235, 238
meson 42, 46, 48, 214
Mikheyev, S. 175
Mills, Robert 88-90, 96, 110
molecule 19, 27
MSW-mechanisme 175
M-theorie 238-240
muon 42-43, 50, 80-81, 84, 152-153, 174, 188, 193
Musset, Paul 116

Nambu, Yoichiro 124-125
Ne'eman, Yuval 65
neutrale stroom 45, 115-118, 153, 173
neutrino 42, 44-45, 47, 60-61, 80-81, 114-117, 152, 172-177, 181, 183, 188, 197, 200, 202
neutron 38-39, 49-50, 52, 70
Nielsen, Holger 125, 133-134, 139
Nieuwenhuizen, Peter van 185
Noether, Emmy 80
Okun, Lev 135-136
Oleson, Poul 133-134, 139
omega-min 65-67

P zie pariteit
paarvorming 98-99
Pais, Abraham 43
pariteit *P* 62-63
Pati, Jogesh 202
Pauli, uitsluitingsprincipe van 44, 46, 99, 186
PC-symmetrie 62-64, 150
Perl, Martin 153
pion 39, 42-43, 48, 53, 79-81, 192
Planck, constante van 22, 26, 36, 43, 73, 136
Planck, Max 22-23
Planckenergie 186
Plancklengte 204-205, 208-209, 218, 225, 231, 233, 254
Planckmassa 204, 221-222, 225, 231, 233
Podolsky, Boris 30, 249

Politzer, David 123
Polyakov, Alexander 135-136, 168
Popov, Victor N. 94, 110, 207
positron 45, 74-75, 80, 140-141, 144, 195
positronium 144, 148
proton 38-39, 42, 48-49, 70, 79, 176, 190-192, 195, 199-202

quantumchromodynamica 129, 134, 138-139, 142, 144, 146, 148, 166, 192, 204, 214
quantumelektrodynamica 73-76, 87, 110
quantummechanica 21, 23-31, 37, 43-44, 73, 78, 148, 161, 190-191,

203, 205, 221, 226, 241, 248-249, 251
quantumzwaartekracht 205, 207, 227, 231, 242
quark 53, 65, 67-68, 70-71, 77, 80, 84, 113, 172, 187, 190-192, 214
quark, charmante *zie* charme
Quinn, Helen 196

Rabi, Isidore I. 42
relativiteitstheorie, algemene 35, 73, 79, 148, 221, 226-227
relativiteitstheorie, speciale 31-34
renormeren 75-77, 82-84, 94-95
resonantie 53-55, 119-120, 142, 153
rho 55, 89, 110-111, 144
Richter, Burton 141
Rosen, Nathan 30, 249
Rovelli, Carlo 242

S zie vreemdheid
Sakurai, Jun J. 82
Salam, Abdus 103, 105, 195, 202
Schrieffer, John R. 98-99
Schrödinger, Erwin 23, 27
Schwartz, Albert 168
Schwartz, John 219
Schwinger, Julian 73, 75
Sen, Ashoke 235
Shaw, Ronald 88
sigma 50, 108
Slavnov, Andrei 207
S-matrix 78-80
Smirnov, A. 175
Smolin, Lee 242
snaardiagram 215-216
snarentheorie 126-127, 215-223, 231, 235-237, 241-243
soliton 235
spiegelsymmetrie 59-61
spin 25, 36-37, 43-48, 70, 112-114, 146, 161, 186, 206
Steinberger, Jack 164
sterke kracht 38, 46-47, 53-54, 58, 65, 72, 77, 107, 119-120, 125, 130, 142, 145, 148, 150, 196-197
strange 159
stromenalgebra 80-81, 84
Sudarshan, George 45, 82
supergeleider 98, 100, 133-134, 138
supergeleiding 97, 99, 128
Super-Kamiokande 176, 200
supernovatheorie 173
supersnarentheorie 220-223, 225, 232
supersymmetrie 185, 187-190, 194, 201, 205, 212, 219, 221, 223-224, 249
superzwaartekracht 205-207, 210, 212-213, 221
Symanzik, Kurt 108-110, 112, 122-123
symmetrie 59, 80, 101, 207

symmetriebreking 100-102, 108-109

T zie tijdsomkering
tachyon 218-219
tau 153, 166, 174
technicolortheorie 192-194
tijdsomkering *T* 63
Ting, Samuel 140-141
Tomonaga, Sin-Itiro 75
top 151-152, 156-157, 159, 166
truth *zie* top
Turlay, René 62
Tyupkin, Yuri 168

Uhlenbeck, George 43
up 151, 159

vacuümpolarisatie 75, 77, 82
VanderWaalskracht 17-18
veld 74, 86, 97, 160-161
veldentheorie 74, 78, 82-83, 85, 235, 237
veldvergelijking 74, 86
Veltman, Martinus 84-85, 90-92, 94, 96, 106, 109-111, 146, 164, 207
Veneziano, Gabriele 119, 125, 214, 218
Venezianoformule 126, 214, 241
vreemdheid *S* 48-49, 54, 57-59, 65, 72, 80, 91, 119

Waals, Johannes Diderik van der 17-18
Ward, John 103
W-boson 197, 201
W-deeltje 45, 91, 111, 115, 153-154, 187-188
Weinberg, Steven 103-105, 111, 112, 114, 118, 153, 195-196, 245
Weinberg-Salammodel 137
Wess, Julius 185
Wilczek, Frank 123
Wit, Bernard de 188
Witten, Edward 219-220, 237, 239
Wolfenstein, Lincoln 175
wormgat 241-243
X-deeltje 197, 199-201

Yang, Chen Ning 60, 88-90, 96, 110
Yang-Millstheorie 86, 90-96, 102, 105, 109, 120, 122-123, 128, 139, 190, 207
Yang-Millsveld 88, 109, 113-114, 150, 164
Yukawa, Hideki 39, 42

Z-deeltje 45, 104-105, 111, 115, 153-156, 160, 173, 183, 187-188, 197, 201
Zichichi, Antonino 152
ZIZO 183, 194
Zumino, Bruno 133-134, 185
zwaartekracht 17, 34-35, 37, 94, 161, 181-182, 189, 203-204, 207, 210, 218-220, 225-230, 233, 236-237, 241, 247, 250
zwaartekracht, theorie van de 85, 87, 92, 94, 106, 204, 206
zwakke kracht 45-49, 52, 59-62, 70-73, 76-77, 82-84, 90-91, 95, 98, 103, 112, 118, 125, 148, 150-153, 162, 181, 195-197, 220
zwart gat 228-236, 240-241, 248
Zweig, George 68